



Studi Literatur Pengaruh Sesar Geologi terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batubara di Indonesia

Ridho Rizky Amanda*

Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: ridhora@unsri.ac.id

Abstract. *The stability of slopes in open-pit coal mining in Indonesia is significantly influenced by geological faults, which are a major factor causing slope failures. This study aims to examine the impact of faults on slope stability by conducting a systematic literature review of 25 scientific publications from 2018 to 2025. The results indicate that faults and fault zones consistently reduce rock mass integrity through several mechanisms, including stress concentration in weak zones, the formation of preferential sliding surfaces, amplification of hydro-mechanical effects from groundwater and rainfall, and the reduction of rock strength parameters. Case studies in Kalimantan and Sumatra confirm these mechanisms with slope failures aligning with fault orientations. Kinematic and numerical analyses using the Limit Equilibrium Method (LEM), Finite Element Method (FEM), and Distinct Element Method (DEM) show a reduction in the safety factor (SF) by up to 36% on slopes affected by faults. Practical recommendations include continuous monitoring using Slope Stability Radar (SSR), optimization of slope geometry with angles $< 18^\circ$ in fault zones, groundwater control, reinforcement with anchors and bolting, and UAV-based discontinuity mapping for hazard zoning. This study concludes that managing slopes in fault zones requires an integrated approach combining detailed geological investigation, multi-method numerical analysis, real-time monitoring, and specific mitigation design.*

Keywords: Coal; Fault; Geometry; Mine; Slope

Abstrak. Kestabilan lereng tambang batubara terbuka di Indonesia sangat dipengaruhi oleh sesar geologi, yang menjadi faktor utama penyebab keruntuhan lereng. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh sesar terhadap kestabilan lereng dengan menggunakan pendekatan systematic literature review terhadap 25 publikasi ilmiah periode 2018-2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa sesar dan zona patahan menurunkan integritas massa batuan melalui beberapa mekanisme, seperti konsentrasi tegangan, pembentukan bidang gelincir, amplifikasi efek hidro-mekanik, dan penurunan kekuatan batuan. Studi kasus di Kalimantan dan Sumatera mengkonfirmasi temuan ini dengan kegagalan lereng yang sejajar dengan orientasi sesar. Analisis numerik menggunakan metode Limit Equilibrium Method (LEM), Finite Element Method (FEM), dan Distinct Element Method (DEM) menunjukkan penurunan faktor keamanan (FK) hingga 36% pada lereng yang terpengaruh sesar. Rekomendasi praktis mencakup monitoring kontinu menggunakan Slope Stability Radar (SSR), pengoptimalan geometri lereng dengan sudut $< 18^\circ$ di zona sesar, pengendalian air tanah, perkuatan dengan anchor dan bolting, serta pemetaan diskontinuitas berbasis UAV. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengelolaan lereng pada zona sesar memerlukan pendekatan terintegrasi, termasuk analisis geologi, numerik, monitoring real-time, dan desain mitigasi spesifik.

Kata kunci: Batubara; Geometri; Lereng; Sesar; Tambang

1. LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan salah satu produsen batubara terbesar di dunia dengan cadangan yang tersebar di berbagai wilayah, terutama Kalimantan dan Sumatera. Metode penambangan batubara di Indonesia didominasi oleh sistem tambang terbuka (*open pit mining*) yang mencapai lebih dari 80% dari total produksi nasional. Dalam operasi tambang terbuka, kestabilan lereng (*slope stability*) menjadi faktor kritis yang menentukan keselamatan operasi, produktivitas, dan kelayakan ekonomi proyek pertambangan (Saksono et al, 2022).

Keruntuhan lereng tambang dapat mengakibatkan konsekuensi serius, termasuk korban jiwa, kerusakan peralatan, gangguan produksi, dan kerugian finansial yang signifikan. Data

historis menunjukkan bahwa insiden keruntuhan lereng di tambang batubara Indonesia sering kali terkait dengan kondisi geologi kompleks, khususnya keberadaan struktur geologi seperti sesar, lipatan, dan diskontinuitas batuan (Idhan et al., 2021). Sesar geologi dalam konteks tambang batubara Indonesia dapat berupa sesar normal, sesar naik (*thrust fault*), atau sesar geser (*strike-slip fault*), dengan orientasi dan karakteristik yang bervariasi. Zona sesar ini umumnya mengalami pelemahan massa batuan akibat proses tektonik, pelapukan, dan alterasi hidrotermal, menciptakan zona lemah yang menjadi bidang gelincir potensial untuk keruntuhan lereng (Amanda et al., 2023).

Indonesia terletak pada zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama (Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik), menghasilkan kondisi geologi yang sangat kompleks dengan aktivitas tektonik tinggi. Kompleksitas ini tercermin dalam keberadaan sistem sesar aktif dan tidak aktif yang tersebar luas di wilayah pertambangan batubara. Cekungan batubara Tersier di Kalimantan dan Sumatera, yang menjadi lokasi utama penambangan, dicirikan oleh struktur geologi kompleks hasil dari proses tektonik Tersier hingga Kuartar (Riswandi & Fitri, 2024).

Keberadaan sesar geologi pada lereng tambang batubara menciptakan beberapa permasalahan geoteknik. Sesar menciptakan bidang diskontinuitas yang memutus kontinuitas massa batuan, mengurangi kekuatan geser dan kohesi material (Azarfar et al., 2019). Zona patahan umumnya mengandung material *gouge* (material hancuran), breksi sesar, dan batuan yang mengalami alterasi intensif, yang memiliki parameter kekuatan jauh lebih rendah dibandingkan batuan induk (Wang et al., 2023). Sesar berfungsi sebagai konsentrator tegangan, mengakibatkan redistribusi tegangan yang tidak merata pada massa batuan di sekitarnya (Chen et al., 2019). Zona sesar sering menjadi jalur preferensial untuk aliran air tanah, meningkatkan tekanan pori dan mengurangi kekuatan efektif massa batuan (Bo et al., 2019). Orientasi sesar relatif terhadap orientasi lereng dapat menciptakan kondisi kinematik yang tidak stabil, seperti *plane failure*, *wedge failure*, atau *toppling failure* (Martireni et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis mekanisme pengaruh sesar geologi terhadap kestabilan lereng tambang batubara berdasarkan literatur terkini (2018-2025). Mengevaluasi metode investigasi dan analisis yang digunakan dalam studi kestabilan lereng di zona sesar. Mendokumentasikan studi kasus keruntuhan lereng terkait sesar di tambang batubara Indonesia. Merumuskan rekomendasi praktis untuk pengelolaan kestabilan lereng di zona sesar.

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep Dasar Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng didefinisikan sebagai kondisi di mana gaya-gaya yang menahan (*resisting forces*) mampu melawan gaya-gaya penggerak (*driving forces*) yang bekerja pada massa tanah atau batuan pada lereng. Secara kuantitatif, kestabilan lereng dinyatakan dalam Faktor Keamanan (FK) atau *Factor of Safety (FOS)*, yang merupakan rasio antara kekuatan geser yang tersedia dengan tegangan geser yang bekerja (Li et al., 2019).

Chen et al. (2025) Kestabilan lereng tambang dipengaruhi oleh interaksi kompleks berbagai faktor yaitu, geometri, material, struktural, hidrogeologi, eksternal, dan waktu. Geometri membahas mengenai tinggi lereng, sudut kemiringan, konfigurasi jenjang. Material mencakup kekuatan batuan utuh, sifat massa batuan, keberadaan lapisan lemah. Struktural membahas sesar, kekar, bidang pelapisan, foliasi. Hidrogeologi mengenai muka air tanah, tekanan pori, infiltrasi. Eksternal mencakup beban seismik, getaran peledakan, beban peralatan. Waktu membahas pelapukan, degradasi kekuatan, perubahan iklim.

Geologi Struktural dan Sesar

Sesar adalah bidang diskontinuitas pada massa batuan di mana telah terjadi perpindahan relatif (*displacement*) antara blok batuan di kedua sisinya. Burda et al. (2022) berdasarkan mekanisme pembentukannya, sesar diklasifikasikan menjadi sesar normal (*normal fault*), sesar naik (*reverse/thrust fault*) sesar geser (*strike-slip fault*). Zona sesar tidak hanya berupa bidang tunggal, tetapi umumnya merupakan zona deformasi dengan lebar bervariasi dari sentimeter hingga puluhan meter. Wei et al., (2024) menyatakan zona sesar terdiri dari beberapa elemen, *fault core*, *damage zone*, dan *protolith*.

Azarfar et al. (2019) karakteristik geoteknik zona sesar yang mempengaruhi kestabilan lereng meliputi, parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) zona sesar umumnya 30-70% lebih rendah dibandingkan batuan induk. Zona *damage* sering memiliki permeabilitas 2-3 *order magnitude* lebih tinggi, menjadi *pathway* air tanah. Sifat mekanik sangat bergantung pada orientasi pembebanan relatif terhadap bidang sesar. Variabilitas spasial parameter geoteknik sangat tinggi dalam zona sesar.

Mekanisme Pengaruh Sesar terhadap Kestabilan Lereng

Chen et al. (2023) sesar mempengaruhi kestabilan lereng melalui beberapa mekanisme struktural, pembentukan bidang gelincir preferensial, diskontinuitas massa batuan, dan konsentrasi tegangan. Bidang sesar dengan kekuatan geser rendah menjadi lokus potensial untuk gelinciran massa batuan. Jika orientasi sesar memenuhi kondisi kinematik tidak stabil (*dip direction* sesar searah dengan *dip direction* lereng dan *dip* sesar lebih rendah dari sudut

lereng), probabilitas kegagalan meningkat signifikan. Sesar memutus kontinuitas massa batuan, menciptakan blok-blok terpisah yang lebih mudah bergerak. Interaksi antara sistem sesar dengan diskontinuitas lain (*bedding, joint*) dapat membentuk *wedge failure* yang kompleks. Zona sesar berfungsi sebagai *stress concentrator*, menghasilkan redistribusi tegangan yang tidak *uniform*. *Finite Element Analysis* menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum dapat meningkat 2-3 kali lipat di ujung sesar (Al Heib et al., 2022).

Bo et al. (2019) menyatakan bahwa Interaksi antara sesar dan sistem hidrogeologi menciptakan efek *coupled* yang kompleks yaitu, peningkatan tekanan pori, *softening* material *gouge*, erosi internal. Zona sesar yang permeabel menjadi *pathway* infiltrasi air hujan dan aliran air tanah. Peningkatan tekanan pori mengurangi tegangan efektif, menurunkan kekuatan geser yang tersedia. Kontak air dengan material *gouge* lempungan dalam zona sesar menyebabkan swelling dan penurunan kekuatan residual hingga 40-60%. Aliran air dalam zona sesar dapat menyebabkan erosi internal (*piping*), mengurangi kohesi dan menciptakan rongga yang menurunkan stabilitas.

Metode Klasifikasi Massa Batuan

Sistem *Rock Mass Rating* (RMR) Bieniawski (1989) mengevaluasi kualitas massa batuan berdasarkan enam parameter: kekuatan batuan utuh, *Rock Quality Designation* (RQD), spasi diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, kondisi air tanah, dan orientasi diskontinuitas. Keberadaan sesar mempengaruhi beberapa parameter RMR, zona sesar menurunkan RQD hingga <25% (*very poor*), sesar umumnya memiliki *aperture* lebar, *filling* lemah, dan *weathering* tinggi, menghasilkan *rating* rendah, dan sesar dengan orientasi tidak menguntungkan mendapat pengurangan *rating* hingga -25.

Hoek et al. (1995) dalam *geology strenght index* (GSI) mengkarakterisasi massa batuan berdasarkan struktur (*blockiness*) dan kondisi permukaan diskontinuitas. Zona sesar dengan struktur *heavily sheared* dan *surface condition slickensided/highly weathered* memiliki GSI 10-30 (*very poor*), dibandingkan GSI 60-80 untuk batuan utuh (Kurniawan & Wijaya, 2025).

Slope Mass Rating (SMR) merupakan adaptasi RMR spesifik untuk aplikasi lereng, dengan adjustment factor berdasarkan orientasi diskontinuitas relatif terhadap lereng (Romana, 1985). SMR sangat relevan untuk evaluasi lereng yang dipengaruhi sesar, dengan klasifikasi nilai SMR 0-20 (*completely unstable*), 21-40 (*unstable*), 41-60 (*partially stable*) 61-80 (*stable*) 81-100 (*completely stable*).

Metode Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kinematik mengevaluasi kemungkinan geometris terjadinya kegagalan berdasarkan orientasi diskontinuitas relatif terhadap orientasi lereng, tanpa mempertimbangkan kekuatan material. Metode ini sangat efektif untuk identifikasi awal potensi kegagalan pada lereng yang dikontrol struktur (Martireni et al., 2023). *Plane Failure* terjadi ketika *dip direction* sesar $\pm 20^\circ$ dari *dip direction* lereng, dan *dip* sesar lebih kecil dari sudut lereng tetapi lebih besar dari sudut geser dalam. *Wedge Failure* terjadi ketika dua bidang diskontinuitas (misalnya sesar dan *bedding*) berpotongan membentuk *wedge* yang *daylight* pada muka lereng. *Toppling Failure* terjadi ketika diskontinuitas sub-vertikal (*steep fault*) memotong lereng dengan *dip direction* berlawanan dengan *dip direction* lereng.

Limit Equilibrium Method (LEM) merupakan metode konvensional yang paling banyak digunakan untuk analisis kestabilan lereng. Metode ini membagi massa lereng menjadi *slices* dan mengevaluasi keseimbangan gaya atau momen untuk menghitung FK. Beberapa metode LEM yang umum yaitu, *Fellenius/Ordinary Method*, *Bishop Simplified Method*, *Janbu Simplified Method*, *Spencer Method*, *Morgenstern-Price Method*. Untuk lereng dengan sesar, *non-circular failure surface* yang mengikuti bidang sesar umumnya digunakan, dengan metode *Spencer* atau *Morgenstern-Price* memberikan hasil paling akurat (Amanda et al., 2023).

Finite Element Method (FEM) memodelkan massa batuan sebagai *continuum* dan menghitung distribusi tegangan-regangan dengan menyelesaikan persamaan keseimbangan dan konstitutif. Li et al. (2019) keunggulan FEM untuk analisis lereng dengan sesar adalah, FK dihitung dengan mereduksi parameter kekuatan secara progresif hingga terjadi *non-convergence* (*Strength Reduction Method*), sesar dapat dimodelkan sebagai *interface weak zone* atau *ubiquitous joint* dengan properti berbeda dari massa batuan sekitar (*Explicit Fault Modeling*), memungkinkan analisis *coupled hydro-mechanical* untuk mengevaluasi efek air tanah pada zona sesar (*Coupled Analysis*), dan memberikan visualisasi distribusi tegangan di sekitar sesar (*Stress Distribution*).

Distinct Element Method (DEM) memodelkan massa batuan sebagai *assemblage of discrete blocks* yang dibatasi oleh diskontinuitas, sangat sesuai untuk massa batuan *heavily jointed dan faulted*. Al Heib et al. (2022) DEM memungkinkan untuk simulasi perpindahan besar dan rotasi blok individual (*Large Displacement*), pemodelan proses *detachment* dan jatuhnya batuan (*Block Detachment*), analisis evolusi kegagalan dari inisiasi hingga *post-failure* (*Progressive Failure*), dan evaluasi mekanisme kegagalan kompleks seperti *block toppling* dan *step-path failure* (*Complex Kinematics*).

Teknik Monitoring Lereng

Slope Stability Radar (SSR) merupakan teknologi *ground-based radar* yang melakukan monitoring perpindahan lereng secara *real-time* dengan akurasi sub-milimeter pada jarak hingga 4 km. Untuk lereng yang dipengaruhi sesar, SSR sangat efektif karena dapat mendeteksi deformasi progresif dan memberikan *early warning* (Idhan et al., 2021). Parameter monitoring meliputi, kecepatan perpindahan, akumulasi perpindahan total, threshold kritis untuk alarm.

Teknologi *remote sensing modern* memberikan *capability monitoring* spasial yang luas. Firmansyah et al. (2022) UAV Photogrammetry dapat melakukan pemetaan diskontinuitas dan monitoring perubahan topografi dengan resolusi cm-level. LiDAR dapat menghasilkan *Digital Elevation Model* (DEM) resolusi tinggi untuk analisis perubahan volume. InSAR menggunakan *satellite-based monitoring* deformasi regional dengan akurasi mm-level.

Strategi Mitigasi

Optimasi geometri lereng merupakan strategi mitigasi primer yang di perlukan untuk mengantisipasi terjadinya *failure*. *Slope Angle Reduction* mengurangi sudut lereng keseluruhan di zona sesar hingga mencapai FK target (umumnya sudut $<18^\circ$ untuk zona sesar mayor) (Amanda et al., 2023). *Berm Width Optimization* melakukan memperlebar *berm* untuk meningkatkan *resisting forces*. *Catch Bench* dengan desain *catch bench* untuk menangkap material runtuh dari *bench* atas. *Setback Distance* menjaga jarak aman dari *trace* sesar pada *crest* lereng.

Untuk lereng kritis di zona sesar yang tidak dapat distabilkan dengan modifikasi geometri. *Rock bolts/anchors* merupakan sistem perkuatan aktif atau pasif untuk meningkatkan kekuatan geser sepanjang bidang sesar (Bo et al., 2019). *Shotcrete* melakukan penambahan lapisan beton semprot untuk proteksi permukaan dan peningkatan kohesi. *Buttress fil* melakukan penimbunan kaki lereng untuk meningkatkan *resisting forces*. *Soil nailing* sistem perkuatan untuk material *soil* atau *heavily weathered rock*.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) untuk mengkaji pengaruh sesar geologi terhadap kestabilan lereng tambang batubara di Indonesia. SLR dipilih karena memungkinkan sintesis komprehensif dan objektif terhadap *evidence base* yang tersedia dalam literatur ilmiah, dengan protokol yang transparan dan dapat direplikasi. Pencarian literatur dilakukan pada database akademik utama pada scispace, google scholar, dan database spesifik.

Kriteria Inklusi yang digunakan dalam penelitian ini mencakup, publikasi tahun 2018-2025, topik relevan dengan sesar geologi dan kestabilan lereng, konteks tambang batubara atau open pit mining, publikasi *peer-reviewed* (jurnal ilmiah, prosiding konferensi), tersedia DOI atau akses penuh, Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia. Proses seleksi dilakukan dalam beberapa tahap yaitu, pencarian awal, *screening* judul dan abstrak, *reranking* berdasarkan relevansi, *full-text assessment*.

Untuk setiap publikasi yang terseleksi, memberikan data yang dapat diekstraksi seperti, Informasi bibliografis (penulis, tahun, judul, jurnal, *volume*, *issue*, halaman, DOI), karakteristik studi (lokasi penelitian, tipe tambang, metode penelitian), temuan utama (mekanisme pengaruh sesar, faktor-faktor kritis, nilai FK). Metode analisis (teknik investigasi, *software* analisis, parameter *input*). Studi kasus (detail kasus keruntuhan lereng terkait sesar di Indonesia), rekomendasi (strategi mitigasi dan *best practices*), limitasi dan gap penelitian (keterbatasan studi dan rekomendasi penelitian lanjutan). Data yang diekstraksi dianalisis menggunakan pendekatan, analisis tematik, analisis komparatif, analisis geografis, analisis metodologis, analisis gap.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Publikasi yang Dikaji

Dari proses *systematic literature review* yang dilakukan, terkumpul beberapa publikasi ilmiah berkualitas tinggi yang memenuhi kriteria inklusi. Publikasi-publikasi ini terdistribusi dalam rentang tahun 2018-2025, dengan mayoritas (68%) dipublikasikan dalam periode 2021-2024, menunjukkan peningkatan minat penelitian terhadap topik ini dalam tahun-tahun terakhir.

Distribusi geografis studi menunjukkan bahwa 40% publikasi merupakan studi kasus spesifik di Indonesia (Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, Sumatera Selatan, dan Jawa Barat), sementara 60% merupakan studi dari negara lain (China, India, Eropa) yang memberikan perspektif komparatif dan kontribusi metodologis. Jurnal publikasi mencakup jurnal internasional bereputasi tinggi seperti *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *Geotechnical and Geological Engineering*, *Frontiers in Earth Science*, serta jurnal nasional Indonesia seperti *Jurnal Pertambangan*, *Indonesian Mining Professionals Journal*, dan *Journal of Applied Geology*.

Mekanisme Pengaruh Sesar Terhadap Kestabilan Lereng

Hasil kajian literatur secara konsisten menunjukkan bahwa sesar dan zona patahan menurunkan integritas massa batuan melalui pembentukan zona lemah dengan parameter kekuatan yang signifikan lebih rendah. Azarfar et al. (2019) dalam studi numerik dan eksperimental mendemonstrasikan bahwa keberadaan sesar menurunkan Faktor Keamanan (FK) lereng dan mengubah mode kegagalan yang diprediksi. Studi ini membandingkan tiga pendekatan pemodelan sesar (*weak-zone*, *ubiquitous-joint*, dan *interface*) dan menemukan bahwa representasi sesar yang berbeda menghasilkan variasi FK dan perilaku kegagalan yang berbeda, menekankan pentingnya pemodelan sesar yang akurat.

Kurniawan & Wijaya, (2025) mengkuantifikasi efek struktur geologi minor pada penurunan kekuatan massa batuan dalam konteks tambang batubara Formasi Muara Enim, Sumatera Selatan. Studi ini menunjukkan bahwa penurunan *Geological Strength Index* (GSI) dari 60 menjadi 30 (akibat peningkatan intensitas struktur minor termasuk sesar kecil) menghasilkan penurunan FK dari 1.494 menjadi 0.959, atau penurunan 36%. Temuan ini menekankan pentingnya memasukkan variabel struktural minor dalam sistem klasifikasi massa batuan dan analisis stabilitas.

Al Heib et al. (2022) menggunakan *Distinct Element Method* untuk menganalisis efek sesar terhadap stabilitas area penambangan lignit permukaan. Studi ini menemukan bahwa sesar dengan orientasi mendekati kemiringan lereng secara signifikan meningkatkan deformasi dan risiko terhadap infrastruktur sekitar. Pemodelan menunjukkan bahwa zona di sekitar sesar mengalami konsentrasi tegangan geser yang dapat mencapai 2-3 kali lipat dibandingkan zona tanpa sesar, mempercepat inisiasi dan propagasi kegagalan.

Wei et al. (2024) mendokumentasikan kasus *landslide* tambang di *Southwest China* di mana sesar yang memisahkan struktur massa batuan *bedding* dari *anti-dipping mass* menyebabkan *sliding*, *toppling*, dan deformasi retrogresif progresif. Studi ini mengilustrasikan bagaimana sesar dapat mengubah struktur massa batuan secara fundamental, menciptakan kondisi kinematik yang sangat tidak stabil.

Wang et al. (2023) melakukan investigasi lapangan, laboratorium, dan numerik 3D terhadap *landslide* tambang batubara terbuka Manglai, menemukan bahwa kombinasi zona fraktur sesar, lapisan lunak (*soft strata*), dan kenaikan air tanah secara bersama-sama menghasilkan *landslide* progresif retrogresif. Studi ini mengidentifikasi mekanisme *coupled* di mana, zona fraktur sesar berfungsi sebagai *pathway preferensial* untuk infiltrasi air hujan, kenaikan muka air tanah meningkatkan tekanan pori dalam zona sesar, peningkatan tekanan

pori mengurangi tegangan efektif dan kekuatan geser, material *gouge* lempungan akibat saturasi air, inisiasi kegagalan lokal yang kemudian berkembang menjadi kegagalan progresif.

Bo et al. (2019) menginvestigasi pengaruh curah hujan terhadap stabilitas *landslide* tambang terbuka Haizhou, dengan fokus pada peran sesar dalam mengontrol risiko reaktivasi. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi sesar dengan infiltrasi air hujan menjadi faktor pengontrol utama reaktivasi *landslide*. Model numerik digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem perkuatan *anchor Constant Resistance Large Deformation* (CRLD) pada lereng yang dipengaruhi sesar, menunjukkan bahwa perkuatan yang dirancang dengan mempertimbangkan efek hidro-mekanik sesar dapat meningkatkan FK hingga 15-20%.

Li et al. (2019) melakukan analisis 3D menggunakan *Finite Element Strength Reduction Method* (FESRM) untuk mengevaluasi pengaruh relatif sesar dan lapisan lemah terhadap stabilitas lereng batuan kompleks. Temuan penting dari studi ini yaitu, lapisan lemah horizontal sering memiliki efek destabilisasi lebih besar dibandingkan sesar vertikal, bidang struktural horizontal sangat mengontrol pola kegagalan, interaksi antara sesar dan lapisan lemah menciptakan kondisi paling kritis, orientasi relatif antara sesar dan geometri lereng menentukan mode kegagalan dominan. Temuan ini penting untuk konteks tambang batubara Indonesia di mana *seam* batubara dan lapisan *overburden* lempungan (lapisan lemah) sering berinteraksi dengan sistem sesar.

Studi Kasus di Indonesia

Amanda et al. (2023) melakukan analisis kestabilan lereng *highwall* terhadap pengaruh sesar di Pit Suban Jeriji Selatan, PT Bukit Asam, Sumatera Selatan. Karakteristik kasus yaitu sesar merupakan *normal fault* dengan *strike* N220°E dan *dip* 55°. Analisis menggunakan *RocScience Slide (Limit Equilibrium Method)*. Permasalahan yang ditemukan yaitu *overall slope* dengan sudut > 18° berada dalam kondisi kritis di mana sesar memotong *highwall*. Sebagai rekomendasi, desain lereng dengan FK 1.2-1.4 untuk stabilitas, memerlukan pengurangan sudut lereng keseluruhan di zona sesar. Studi ini memberikan contoh praktis penerapan analisis numerik untuk optimasi desain lereng di zona sesar, dengan rekomendasi spesifik untuk parameter geometri yang aman.

Idhan et al. (2021) mendokumentasikan kegagalan *highwall* tambang batubara di Bengalon, Kutai Timur, Kalimantan Timur, dengan *monitoring* menggunakan *Slope Stability Radar (SSR)*. Karakteristik kasus yaitu bidang sesar dengan *strike* N246°E, *dip* 48°. Pada observasi ditemukan kegagalan lereng sejajar dengan orientasi sesar. *Monitoring* menggunakan SSR merekam kecepatan deformasi progresif, mencapai 13,568 mm/jam saat kegagalan. *Threshold* dengan Data mendukung penggunaan *threshold* berbasis kecepatan untuk *early*

warning pada dinding yang dipengaruhi sesar. Studi ini mendemonstrasikan pentingnya *monitoring real-time* untuk lereng di zona sesar dan efektivitas SSR dalam mendeteksi percepatan deformasi pra-kegagalan.

Firmansyah et al. (2022) melakukan analisis risiko keruntuhan lereng menggunakan *discontinuity mapping* berbasis *remote sensing* (UAV) dan analisis kinematik di Pit C2HS, Sambarata Mine Operation, PT Berau Coal, Kalimantan Timur. Karakteristik kasus adalah kondisi geologi merupakan area struktural kompleks dengan *multiple faults* dan antiklin. Metode menggunakan UAV *photogrammetry* untuk *discontinuity mapping*, analisis kinematik untuk evaluasi potensi kegagalan. Hasil *output* berupa peta zonasi bahaya dan peta potensi kegagalan kinematik. *Discontinuity mapping* berbasis UAV memungkinkan identifikasi struktur yang tidak terdeteksi dalam pemetaan konvensional. Studi ini menunjukkan evolusi teknologi investigasi geoteknik, di mana UAV *photogrammetry* memberikan data diskontinuitas resolusi tinggi secara efisien untuk area luas, sangat bermanfaat untuk tambang dengan geologi struktural kompleks.

Saksono et al. (2022) melakukan studi geologi teknik dan kestabilan lereng *West Pit* tambang batubara PT Tawabu Mineral Resource, Kalimantan Timur. Karakteristik kasus yaitu, metode yang digunakan survei geologi teknik, uji laboratorium, analisis LEM deterministik dan probabilistik. Temuan pada penelitian satu lereng *highwall* timur teridentifikasi tidak stabil. Rekomendasi yang diberikan penurunan muka air tanah atau pengurangan sudut lereng sebagai remediasi. Pendekatan menggunakan analisis probabilistik memberikan pemahaman lebih komprehensif tentang ketidakpastian parameter dalam zona sesar. Studi ini menekankan pentingnya pendekatan probabilistik dalam analisis lereng di zona sesar, di mana variabilitas parameter geoteknik tinggi dan pendekatan deterministik tunggal mungkin tidak cukup untuk menangkap range kemungkinan kondisi.

Riswandi & Fitri (2024) melakukan studi geologi dan pengaruh struktur kekar terhadap kestabilan lereng desain pit pada tambang terbuka batubara Lawang Kidul, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Karakteristik kasus adalah, metode yang digunakan pemetaan lapangan, *scanline*, analisis RMR/SMR/GSI/RQD. Fokus penelitian pada pengaruh *fracture* (kekar) yang terkait dengan zona sesar terhadap geometri *bench*. *output* yang didapatkan berupa parameter desain lereng aman berdasarkan klasifikasi massa batuan. Temuan pada kasus ini yaitu *fracture intensity* tinggi di zona dekat sesar memerlukan desain *bench* lebih konservatif. Studi ini mengilustrasikan aplikasi sistem klasifikasi massa batuan *multiple* (RMR, SMR, GSI) untuk desain lereng, pendekatan yang direkomendasikan untuk kondisi geologi kompleks.

Martireni et al. (2023) melakukan *rock slope stability assessment* menggunakan analisis kinematik di Gunung Batu, Lembang, Jawa Barat, dengan fokus pada pengaruh Sesar Lembang. Karakteristik kasus mencakup, Sesar berupa Sesar Lembang (sesar aktif regional). Metode menggunakan analisis kinematik dan *rock mass rating*. Temuan pada penelitian berupa aktivitas Sesar Lembang berkontribusi terhadap potensi *wedge failure* dan *toppling failure*. SMR menunjukkan kondisi *partially stable* hingga *stable*, tetapi dengan kontrol struktural kuat terhadap tipe kegagalan. Implikasi yang ada berupa Sesar aktif regional memberikan dimensi tambahan risiko seismik terhadap stabilitas lereng. Studi ini penting karena mengangkat isu sesar aktif dan risiko seismik, aspek yang sangat relevan untuk Indonesia sebagai wilayah tektonik aktif tetapi sering kurang mendapat perhatian dalam desain lereng tambang.

Metode Analisis yang Digunakan

Kurniawan & Wijaya (2025) menekankan pentingnya memasukkan variabel struktural (termasuk sesar minor) dalam *adjustment* parameter Hoek-Brown dan GSI. Studi ini menunjukkan bahwa penurunan GSI dari 60 ke 30 (mencerminkan peningkatan intensitas struktural) menurunkan FK dari 1.494 ke 0.959, demonstrasi kuantitatif pentingnya koreksi struktural yang akurat. Riswandi & Fitri (2024) serta Martireni et al. (2023) mengaplikasikan *multiple classification systems* (RMR, SMR, GSI) secara paralel untuk *cross-validation* dan pemahaman komprehensif kondisi massa batuan. Pendekatan multi-sistem ini direkomendasikan sebagai *best practice* untuk kondisi geologi kompleks dengan sesar.

Analisis kinematik digunakan secara luas sebagai *screening tool* untuk identifikasi awal potensi kegagalan pada lereng yang dikontrol struktur. Firmansyah et al. (2022) dan Martireni et al. (2023) mendemonstrasikan aplikasi analisis kinematik untuk identifikasi mode kegagalan potensial (*plane*, *wedge*, *toppling*) berdasarkan orientasi diskontinuitas relatif terhadap orientasi lereng.

Limit Equilibrium Method (LEM) tetap menjadi metode paling populer untuk analisis kestabilan lereng tambang, digunakan dalam mayoritas studi yang dikaji (Amanda et al., 2023; Bo et al., 2019; Saksono et al., 2022). *Software* yang umum digunakan meliputi *RocScience Slide*, *GeoStudio SLOPE/W*, dan *Rocscience Phase2*. Saksono et al. (2022) mendemonstrasikan nilai tambah analisis probabilistik (*Monte Carlo simulation*) yang memperhitungkan variabilitas parameter dalam zona sesar, memberikan *probability of failure* dan *confidence interval* FK, informasi yang lebih kaya dibandingkan FK deterministik tunggal.

Finite Element Method (FEM) dengan *Strength Reduction Method* digunakan untuk analisis lereng kompleks dengan *multiple faults* dan *weak layers*. Li et al. (2019) menggunakan FESRM untuk analisis 3D lereng batuan kompleks yang dipengaruhi sesar dan lapisan lemah,

menunjukkan keunggulan FEM, mampu memodelkan sesar secara eksplisit dengan properti berbeda, memberikan distribusi tegangan di sekitar sesar, mengidentifikasi zona konsentrasi tegangan, mengevaluasi efek *coupled* dari *multiple structural features*. Azarfar et al. (2019) membandingkan tiga pendekatan pemodelan sesar dalam FEM (*weak-zone*, *ubiquitous-joint*, *interface*) dan menemukan bahwa representasi yang berbeda menghasilkan FK dan mode kegagalan berbeda, menekankan pentingnya validasi model dengan data eksperimental atau observasi lapangan.

Distinct Element Method (DEM) digunakan untuk kasus di mana massa batuan sangat terfraktur dan perilaku diskontinuum dominan. Al Heib et al. (2022) menggunakan DEM untuk menganalisis efek sesar terhadap stabilitas area penambangan lignit, menunjukkan kemampuan DEM dalam, memodelkan *large displacement* dan rotasi blok, simulasi *progressive failure* dari inisiasi hingga *post-failure*, evaluasi efek sesar terhadap deformasi zona sekitar, analisis dampak terhadap infrastruktur *adjacent*. Keterbatasan DEM termasuk *computational cost* tinggi dan kebutuhan akan parameter *input* yang ekstensif, sehingga umumnya digunakan untuk kasus-kasus kompleks yang tidak dapat ditangani *adequately* oleh LEM atau FEM.

Teknik Monitoring dan Early Warning

Idhan et al. (2021) mendokumentasikan aplikasi *Slope Stability Radar* (SSR) untuk *monitoring highwall* yang dipengaruhi sesar di Bengalon, menunjukkan bahwa SSR mampu merekam *progressive velocity* hingga kegagalan (13,568 mm/jam pada saat *failure*). Studi ini mendukung penggunaan *velocity-based threshold* untuk *early warning system*, SSR memberikan data *displacement real-time* dengan akurasi sub-mm, *threshold* berbasis kecepatan deformasi lebih *reliable* dibandingkan *absolute displacement* untuk lereng di zona sesar yang dapat mengalami percepatan deformasi tiba-tiba, SSR dapat *monitoring* area luas (hingga 4 km²) simultan, penting untuk mengidentifikasi zona kritis di sepanjang *trace* sesar.

Firmansyah et al. (2022) mendemonstrasikan aplikasi UAV *photogrammetry* untuk *discontinuity mapping* di area struktural kompleks. Keunggulan teknologi UAV, *mapping* area ekstensif dalam waktu singkat, identifikasi struktur dengan *spacing* cm-level, menghindari akses langsung ke area berbahaya, monitoring perubahan temporal dengan *repeat survey*, dan menghasilkan model 3D untuk analisis kinematik dan volumetrik. Chen et al. (2025) mengintegrasikan UAV *imagery* dengan simulasi 3D untuk evaluasi mekanisme kegagalan *excavation-induced large-scale landslides* di tambang batubara terbuka Xinjing, menunjukkan *trend* integrasi multi-teknologi untuk analisis komprehensif.

Strategi Mitigasi dan Best Practices

Amanda et al. (2023) merekomendasikan desain lereng dengan FK 1.2 - 1.4 untuk zona yang dipengaruhi sesar, dengan sudut *overall slope* $< 18^\circ$ untuk sesar normal dengan dip 55° . Ini merefleksikan pendekatan konservatif yang diperlukan untuk zona sesar. Prinsip desain geometri untuk zona sesar adalah pengurangan sudut lereng keseluruhan hingga mencapai FK target. *Berm* lebih lebar untuk meningkatkan *resisting forces* dan *provide catch capacity*. Hindari penempatan *crest* lereng terlalu dekat dengan *trace* sesar mayor. Desain *multiple bench* dengan *overall slope* lebih landai dibandingkan *single high bench*.

Saksono et al. (2022) merekomendasikan penurunan muka air tanah sebagai salah satu opsi remediasi untuk lereng tidak stabil. Bo et al. (2019) menunjukkan bahwa kombinasi sesar dengan infiltrasi air hujan menjadi faktor pengontrol utama reaktivasi *landslide*, menekankan kritikalitas manajemen air. Strategi pengendalian air tanah yaitu, efektif untuk menurunkan muka air tanah di zona sesar yang permeabel, untuk penurunan air tanah regional, *divert surface water away* dari zona sesar untuk *minimize* infiltrasi, *continuous monitoring* tekanan pori dalam zona sesar. Wang et al. (2023) menunjukkan bahwa kenaikan muka air tanah dalam zona fraktur sesar menjadi *trigger* utama *landslide* Manglai, *reinforcing* pentingnya *proactive groundwater management*.

Bo et al. (2019) mengevaluasi efektivitas sistem *anchor Constant Resistance Large Deformation* (CRLD) untuk lereng yang dipengaruhi sesar dan *rainfall-induced instability*. Studi numerik menunjukkan bahwa *anchor system* yang dirancang dengan mempertimbangkan efek sesar dapat meningkatkan FK hingga 15-20%. Prinsip perkuatan untuk zona sesar yakni, fokus perkuatan pada zona sesar kritis, orientasi *anchor perpendicular* terhadap bidang sesar untuk *maksimal effectiveness*, sistem yang dapat *accommodate* deformasi besar tanpa *loss of capacity*, dan kombinasi *anchor* dengan *surface protection* (*shotcrete*, *mesh*) untuk *comprehensive stabilization*. Chen et al. (2025) merekomendasikan pendekatan *multimethod coupling* yang mengintegrasikan *monitoring*, analisis numerik, dan *preventive measures* untuk *slope stability management* yang efektif.

Gap Penelitian dan Arah Masa Depan

Azarfar et al. (2019) mengidentifikasi bahwa kalibrasi laboratorium model sesar numerik masih langka. Studi ini melakukan eksperimen laboratorium skala besar untuk kalibrasi model numerik dan menemukan bahwa *calibrated model* memberikan *agreement* yang lebih baik dengan *observed behavior*. Lebih banyak eksperimen laboratorium terkontrol untuk validasi berbagai pendekatan pemodelan sesar (*weak-zone*, *interface*, *ubiquitous-joint*).

Protokol standar untuk kalibrasi parameter zona sesar dari data laboratorium dan lapangan. *Sensitivity analysis* terhadap *mesh density*, *constitutive model*, dan *boundary conditions*.

Kurniawan & Wijaya (2025) menunjukkan bahwa struktur minor (*small-scale fractures*) secara material mengubah FK tetapi sering tidak *adequately captured* dalam sistem klasifikasi standar. Metode standar untuk memasukkan *small-scale structures* dalam GSI/RMR *corrections*. Hubungan kuantitatif antara *fracture intensity metrics* (P10, P21, P32) dan parameter kekuatan. Pemahaman efek skala dalam *extrapolation* dari pengukuran *outcrop* ke massa batuan in-situ

Wang et al. (2023) dan Bo et al. (2019) mengidentifikasi *pentingnya coupled hydro-mechanical processes* dalam zona sesar, tetapi studi dengan *fully coupled 3D transient modeling* masih terbatas. Lebih banyak studi dengan *coupled hydro-mechanical analysis* untuk prediksi *progressive failure under rainfall* dan *groundwater rise*. Validasi model *coupled* dengan monitoring data (*piezometric + deformation*) dari kasus actual. *Incorporation of time-dependent strength degradation* dalam zona sesar akibat *cyclic wetting-drying* dan *chemical weathering*.

Firmansyah et al. (2022) dan Idhan et al. (2021) mendemonstrasikan *value* dari *monitoring technologies* (UAV, SSR), tetapi protokol standar untuk *integrating monitoring data into design update* masih *under-developed*. Pengembangan *workflow* standar yang mengintegrasikan UAV *mapping*, SSR *monitoring*, LEM/FEM/DEM *back-analysis*, dan *design optimization*. Protokol untuk *back-analysis* parameter kekuatan zona sesar dari *monitoring data (inverse analysis)*. Sistem untuk *real-time update probabilistic risk assessment* berdasarkan *monitoring data* kontinyu. *Adaptation of international best practices* untuk kondisi spesifik tambang batubara Indonesia (*tropical climate, weathering, regulatory framework*)

Martireni et al. (2023) mengangkat isu sesar aktif (Sesar Lembang) dan implikasinya terhadap *slope stability*, tetapi studi yang secara eksplisit mengintegrasikan *seismic hazard analysis* dengan *slope stability analysis* masih sangat terbatas untuk konteks Indonesia. Analisis *pseudo-static* atau *dynamic slope stability* untuk lereng di *proximity active faults*. *Ground motion prediction* karakterisasi *ground motion* di dekat sesar aktif untuk *input analisis seismic*. *Liquefaction potential* evaluasi potensi *liquefaction* di zona sesar dengan *material gouge saturated*. *Post-seismic monitoring* Protokol *monitoring post-seismic* untuk deteksi *damage* akumulasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Sesar geologi secara konsisten menurunkan kestabilan lereng tambang batubara melalui empat mekanisme utama, pembentukan zona lemah dengan parameter kekuatan 30-70% lebih rendah dari batuan induk, konsentrasi tegangan yang meningkatkan tegangan geser lokal 2-3 kali lipat, amplifikasi efek hidro-mekanik melalui peningkatan permeabilitas dan tekanan pori, dan penciptaan bidang gelincir preferensial dengan orientasi kinematik tidak menguntungkan. Penurunan Faktor Keamanan akibat sesar dapat mencapai 36% berdasarkan studi kuantitatif.

Dokumentasi kasus keruntuhan lereng di tambang batubara Indonesia (Kalimantan dan Sumatera) mengkonfirmasi mekanisme teoritis, dengan kegagalan yang sejajar dengan orientasi sesar. Kasus-kasus di Bengalon (Kalimantan Timur), Suban Jeriji Selatan (Sumatera Selatan), Sambarata (Kalimantan Timur), dan Tawabu (Kalimantan Timur) mendemonstrasikan variasi manifestasi pengaruh sesar dalam konteks geologi dan operasional berbeda.

Pendekatan multi-metode yang mengintegrasikan klasifikasi massa batuan (RMR, SMR, GSI), analisis kinematik, *Limit Equilibrium Method*, dan metode numerik (FEM, DEM) memberikan pemahaman paling komprehensif. Analisis probabilistik direkomendasikan untuk memperhitungkan variabilitas tinggi parameter dalam zona sesar. Representasi sesar yang akurat dalam model numerik (*weak-zone, interface, ubiquitous-joint*) *critical* untuk prediksi FK dan mode kegagalan yang *reliable*.

Slope Stability Radar (SSR) terbukti efektif untuk *early warning* dengan *velocity-based threshold*. UAV *photogrammetry* memberikan *discontinuity mapping* resolusi tinggi untuk area luas dengan efisiensi tinggi. Integrasi multi-teknologi monitoring (SSR, UAV, instrumentasi geoteknik) memberikan *coverage komprehensif*.

Pengelolaan lereng di zona sesar memerlukan pendekatan terintegrasi, optimasi geometri dengan sudut lereng $< 18^\circ$ untuk zona sesar mayor dan FK target 1.2-1.4, pengendalian air tanah melalui horizontal *drains* dan *dewatering* untuk menurunkan tekanan pori, perkuatan struktural *targeted* dengan sistem *anchor* CRLD pada zona kritis, dan *monitoring* kontinyu dengan *early warning system*.

Gap utama teridentifikasi meliputi, kebutuhan kalibrasi laboratorium model sesar numerik dengan eksperimen terkontrol, kuantifikasi struktur minor dalam sistem klasifikasi massa batuan, *coupled hydro-mechanical modeling 3D transient* dengan validasi lapangan, protokol standar *monitoring-to-design feedback loop* untuk konteks Indonesia, dan integrasi *seismic hazard analysis* untuk lereng di *proximity active faults*.

Lakukan lebih banyak eksperimen laboratorium terkontrol untuk kalibrasi model numerik zona sesar, dengan fokus pada karakterisasi parameter kekuatan, permeabilitas, dan *time-dependent behavior material gouge* dan *damage zone*. Establish database nasional kasus keruntuhan lereng terkait sesar di Indonesia dengan dokumentasi komprehensif (geologi, *monitoring data, failure mechanism, remediation*). Database ini akan sangat *valuable* untuk validasi model dan *development of empirical correlations*. Kembangkan dan validasi model *coupled hydro-mechanical 3D* untuk zona sesar dengan *field monitoring data*, focus pada *transient behavior under rainfall* dan *seasonal groundwater fluctuation*. Lakukan penelitian *integrasi seismic hazard analysis* dengan *slope stability analysis* untuk tambang di *proximity active faults*, develop guidelines untuk *seismic slope design* di Indonesia. Eksplorasi aplikasi *machine learning* untuk *prediction of slope failure* berdasarkan *monitoring data time-series* dari lereng di zona sesar, *develop early warning algorithms*.

DAFTAR REFERENSI

- Al Heib, M., Zevgolis, I. E., Theocharis, A. I., Koukoulzas, N. C., & Coccia, S. (2022). Analysis of faults' effect on the stability of surface lignite mining areas using the distinct element method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 1307–1321. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01964-z>
- Amanda, R. R., Ibrahim, E., & Komar, S. (2023). Analisis kestabilan lereng highwall terhadap pengaruh sesar di pit Suban Jeriji Selatan, PT Bukit Asam. *Jurnal Pertambangan*, 7(4), 175–181. <https://doi.org/10.36706/jp.v7i4.2090>
- Azarfar, B., Ahmadvand, S., Sattarvand, J., & Abbasi, B. (2019). Stability analysis of rock structure in large slopes and open-pit mine: Numerical and experimental fault modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(12), 4889–4905. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley.
- Bo, A., Chun, Z., Kuiming, L., Sitong, L., Zhigang, T., Haipeng, L., & Haoran, Y. (2019). The influence of rainfall on landslide stability of an open-pit mine: The case of Haizhou open-pit mine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 3367–3378. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00851-y>
- Burda, J., Mrlina, J., & Vilímek, V. (2022). Geodynamic phenomena in hazardous fault zones affected by extensive surface mining in Central Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(4), 153. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02650-x>
- Chen, H., Wang, B., & Dou, Z. (2025). Multiscale analysis and preventive measures for slope stability in open-pit mines using a multimethod coupling approach. *Applied Sciences*, 15(19), 10367. <https://doi.org/10.3390/app151910367>
- Chen, S., Goh, T. L., Liu, H., & Tovele, G. S. V. (2019). Effects of tectonic stresses and structural planes on slope deformation and stability at the Buzhaoba open-pit mine, China. *Sains Malaysiana*, 48(2), 317–324. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4802-07>

- Chen, T., Shu, J., Han, L., Tovele, G. S. V., & Li, B. (2023). Landslide mechanism and stability of an open-pit slope: The Manglai open-pit coal mine. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1038499>
- Firmansyah, Y. C., Syaumi, D. Y., & Hakim, L. (2022). Analisis resiko keruntuhan lereng menggunakan discontinuity mapping-remote sensing dan analisis kinematik di pit C2HS, Sambarata mine operation, PT Berau Coal. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 4(2), 135–144. <https://doi.org/10.36986/impj.v4i2.81>
- Hadi Kurniawan, & Andy Erwin Wijaya. (2025). Pengaruh struktur geologi minor pada penurunan kekuatan bantuan dalam stabilitas kestabilan lereng tambang batubara, Formasi Muara Enim, Sungai Lilin, Sumatra Selatan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 25(1), 20–25. <https://doi.org/10.37412/jrl.v25i1.373>
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema.
- Idhan, M. A., Alhabsyi, G. A., & Ikbali, M. (2021). Structural geology fault effect on highwall coal mining and failure evaluation based on velocity data at Bengalon, East-Kutai District, East Kalimantan Province. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 3(1), 9–16. <https://doi.org/10.36986/impj.v3i1.31>
- Li, Y., Yu, L., Song, W., & Yang, T. (2019). Three-dimensional analysis of complex rock slope stability affected by fault and weak layer based on FESRM. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 6380815. <https://doi.org/10.1155/2019/6380815>
- Martireni, A. P., Sugianti, K., Hermawan, K., Tohari, A., Wibawa, S., & Soebeowo, E. (2023). Rock slope stability assessment using kinematic analysis at Gunung Batu, Lembang, West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1173(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012026>
- Riswandi, H., & Fitri, A. (2024). Geologi dan pengaruh struktur kekar terhadap kestabilan lereng desain pit pada tambang terbuka batubara Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muaraenim, Sumatra Selatan. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGEA*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.31315/jigp.v11i2.12939>
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works* (pp. 49–53). Zacatecas: International Society of Rock Mechanics.
- Saksono, R. T., Indrawan, I. G. B., & Wilopo, W. (2022). Engineering geology and slope stability of West Pit coal mine of PT. Tawabu Mineral Resource, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 7(2), 83. <https://doi.org/10.22146/jag.76532>
- Wang, C., Min, H., Zhu, T., Wang, H., Qin, W., & Zhang, G. (2023). Failure mechanism and stability analysis of the landslide: A case study for open pit iron mine in Xichang, Sichuan, China. *Natural Hazards*, 116(1), 663–691. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05693-1>
- Wei, T., Chen, G., Zhu, Z., Tang, P., & Yan, M. (2024). Slope instability mechanism with differential rock mass structure along a fault: A mine landslide from Southwest China. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 10(1), 76. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00795-5>