

Integrasi Revisi Geometri, Pengendalian Rembesan, dan Drainase untuk Meningkatkan Kestabilan Lereng Tambang

Kadek Morah Julius B*, Bagus Budhi Bowo Laksono, Ardhika Kurniawan, Fika Kurniawan, Joko Triraharjo

PT PPA, Indonesia

Email: kadra.juvan@gmail.com*, budhibowo338@gmail.com,
ardhika.kurniawan@ppa.co.id, fika@ppa.co.id

Keywords:

drainage optimization; mine slope; safety factor; seepage control; slope stability

Abstract

Open-pit mine slope instability threatens worker safety, operational continuity, infrastructure reliability, and production performance, particularly when adverse geometry interacts with seepage and inadequate drainage. This study aimed to explain the relationship between identified instability factors, integrated corrective measures, and changes in slope stability after intervention. An evaluative engineering design with a before-and-after approach was applied to Sections A and B. Data were obtained from field observations, available slope stability analyses, and inspections of drainage and seepage conditions. Stability was assessed using the factor of safety (FoS) and probability of failure (PoF), with a post-intervention FoS above 1.30 as the technical success criterion. Initially, Section A recorded an FoS of 1.022 and a PoF of 35.7%, while Section B recorded an FoS of 1.011 and a PoF of 49.0%, making Section B the higher-priority area. Field findings identified sidewall failures, seepage-related ponding on benches, easily displaced fill material, and drainage channels obstructed by failed material. An integrated intervention combining geometry revision, seepage control, material management, drainage restoration and optimization, and monitoring increased the FoS in both sections to above 1.30. The study concludes that sustainable slope stabilization requires an integrated geotechnical-hydrological cycle supported by adaptive monitoring rather than isolated reshaping measures.

Kata Kunci:

faktor keamanan; kestabilan lereng; optimasi drainase; pengendalian rembesan; tambang terbuka

Abstrak

Ketidakstabilan lereng tambang terbuka mengancam keselamatan pekerja, kesinambungan operasi, keandalan infrastruktur, dan pencapaian produksi, terutama ketika geometri yang tidak memadai berinteraksi dengan rembesan dan gangguan drainase. Penelitian ini bertujuan menjelaskan hubungan antara faktor penyebab ketidakstabilan, tindakan perbaikan terpadu, dan perubahan kestabilan lereng setelah intervensi. Penelitian menggunakan desain evaluatif teknik dengan pendekatan sebelum dan sesudah pada Bagian A dan Bagian B. Data diperoleh melalui observasi lapangan, hasil analisis kestabilan lereng yang tersedia, serta pemeriksaan kondisi drainase dan rembesan. Kestabilan dinilai berdasarkan faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK), dengan FK pascaperbaikan di atas 1,30 sebagai kriteria keberhasilan teknis. Kondisi awal menunjukkan FK 1,022 dan PK 35,7% pada Bagian A, serta FK 1,011 dan PK 49,0% pada Bagian B, sehingga Bagian B menjadi prioritas penanganan. Temuan lapangan mencakup longsoran sidewall, genangan akibat rembesan pada jenjang, material bekas timbunan yang mudah bergerak, serta saluran drainase yang tertutup material longsor. Intervensi terpadu berupa revisi geometri, pengendalian rembesan, penataan material, pemulihan dan optimalisasi drainase, serta pemantauan meningkatkan FK kedua bagian hingga melampaui 1,30. Penelitian menyimpulkan bahwa

stabilisasi lereng berkelanjutan memerlukan siklus geoteknik-hidrologi terpadu yang didukung pemantauan adaptif, bukan sekadar perbaikan geometri secara terpisah. Pendekatan ini juga memperkuat pengendalian risiko dan respons operasional terhadap perubahan lapangan.

PENDAHULUAN

Kestabilan lereng merupakan salah satu elemen pengendali risiko yang paling penting dalam operasi tambang terbuka karena kegagalan lereng dapat memengaruhi keselamatan personel, kontinuitas akses, ketersediaan area kerja, keandalan infrastruktur tambang, dan pencapaian produksi. Risiko tersebut tidak hanya ditentukan oleh kemiringan lereng, tetapi juga oleh kondisi material, tekanan air pori, perubahan geometri akibat aktivitas penambangan, serta kualitas pengelolaan air. Studi kestabilan lereng tambang menunjukkan bahwa evaluasi faktor keamanan perlu dibaca bersama dengan probabilitas kelongsoran dan konsekuensi operasional agar keputusan desain tidak berhenti pada satu indikator deterministik saja (Rusni et al., 2019; Afasedanya, 2025; Masri et al., 2024). Pendekatan demikian menjadi semakin relevan pada lereng yang berada dekat jalan angkut, disposal, sungai, atau fasilitas produksi yang sensitif terhadap gangguan geoteknik (Wibowo & Nurhakim, 2022; Wibowo & Hermawan, 2025).

Air merupakan pengontrol utama yang sering memperburuk kondisi lereng. Hujan, rembesan, dan genangan pada bench dapat meningkatkan kejenuhan, menaikkan tekanan air pori, mengurangi tegangan efektif, serta menurunkan kekuatan geser material. Analisis numerik terhadap pengaruh hujan pada lereng timbunan tambang memperlihatkan pentingnya memasukkan respons hidrologi ke dalam evaluasi kestabilan, sedangkan studi pada clay shale menegaskan manfaat pembacaan probabilistik dan deterministik secara bersamaan untuk material yang sensitif terhadap perubahan kadar air (Akbar et al., 2025; Pratama, 2021). Dalam konteks yang lebih luas, koreksi dan kualitas data curah hujan juga penting karena data hidrometeorologi yang bias dapat menggeser estimasi beban air yang digunakan dalam desain dan evaluasi drainase (Romadhoni et al., 2021).

Masalah air pada tambang tidak dapat dipisahkan dari kualitas infrastruktur drainase. Pengelolaan aliran, kapasitas saluran, arah limpasan, dan pemeliharaan jalur pembuangan menentukan apakah air dapat dialirkan keluar dari area kritis atau justru terakumulasi pada bench dan kaki lereng. Literatur rekayasa drainase perkotaan menunjukkan bahwa pemodelan sistem aliran dan optimasi jaringan dapat dipakai untuk mengidentifikasi titik genangan serta mengarahkan intervensi pada komponen yang membatasi kapasitas sistem (Sunaryo et al., 2026; Kurniawan et al., 2026). Meskipun konteks tambang berbeda dari kawasan perkotaan, prinsip hidrauliknya serupa: air perlu diberikan jalur yang terencana, memiliki kapasitas cukup, dan dipelihara agar tidak kehilangan fungsi. Kerangka infrastruktur berkelanjutan juga menekankan pentingnya kolaborasi lintas bidang teknik ketika masalah geoteknik, hidrologi, dan operasional saling berinteraksi (Supit et al., 2025).

Kegagalan lereng timbunan dan disposal menunjukkan bahwa geometri, sifat material, aktivitas alat berat, serta peledakan dapat bekerja secara simultan. Kajian pada lereng timbunan pascalongsor menggarisbawahi kebutuhan redesign yang responsif terhadap kondisi aktual, sementara penelitian mengenai aktivitas alat berat dan peledakan menempatkan beban operasional sebagai faktor yang perlu diperhitungkan dalam stabilitas timbunan (Muwaffaqi,

2025; Suparno et al., 2025). Pada area disposal, desain geometri dan penataan kembali lahan juga menjadi bagian dari pengendalian risiko jangka panjang dan reklamasi (Wilson, 2024; Panrita, 2025). Dengan demikian, perbaikan kestabilan seharusnya tidak diperlakukan sebagai tindakan tunggal, melainkan kombinasi pengendalian geometri, air, material, dan aktivitas operasional.

Sejumlah studi telah menawarkan berbagai pendekatan perbaikan. Rekayasa ulang geometri lereng dilakukan dengan menyesuaikan tinggi, sudut, dan konfigurasi bench berdasarkan faktor keamanan yang ditargetkan (Prabowo et al., 2022; Simbolon et al., 2020). Analisis balik digunakan untuk memahami parameter yang lebih representatif setelah terjadi ketidakstabilan dan menyusun rekomendasi rekayasa yang lebih sesuai dengan mekanisme kegagalan aktual (Selsabeel et al., 2021). Penggunaan geogrid dapat menjadi opsi perkuatan ketika masalah didominasi oleh keterbatasan kekuatan dan deformasi tanah timbunan (Laksono & Prihatiningsih, 2025), sedangkan pemantauan menggunakan slope stability radar dapat memberikan kontrol temporal terhadap deformasi lereng selama operasi (Simamora, 2020). Pada overburden lempung, metode keseimbangan batas seperti Fellenius tetap digunakan sebagai alat evaluasi sederhana untuk menilai kecenderungan kestabilan berdasarkan parameter geoteknik yang tersedia (Ashar et al., 2025).

Kebutuhan akan integrasi juga tampak pada bidang-bidang rekayasa lain. Pengelolaan limbah cair pascatambang yang dikaitkan dengan stabilitas geoteknik menunjukkan bahwa fungsi lingkungan dan kestabilan fisik tidak dapat dipisahkan (Supriyanto et al., 2026). Program pengendalian lumpur yang menggabungkan pengaliran, peralatan, perkuatan, dan penataan memperlihatkan manfaat pendekatan multiintervensi terhadap masalah yang memiliki sumber risiko berlapis (Inayatullah & Prabawati, 2025). Dalam skala lingkungan, sanitasi kawasan wisata dan pengelolaan limbah peternakan sama-sama menegaskan perlunya sistem aliran, penampungan, dan pemeliharaan yang konsisten agar dampak sekunder tidak berkembang (Charisma et al., 2025; Sari et al., 2024). Bahkan dalam manajemen lalu lintas, keterkaitan antara pengaturan aliran, kapasitas infrastruktur, kemacetan, dan keselamatan menunjukkan pola sistemik yang serupa: gangguan pada satu jalur dapat menggeser beban ke komponen lain dan menurunkan kinerja sistem secara keseluruhan (Indonesia-STTD & Bali, 2022; Matana et al., 2025).

Meskipun literatur mengenai analisis kestabilan, probabilitas longsor, redesign, perkuatan, dan drainase telah berkembang, masih terdapat kesenjangan pada dokumentasi evaluasi before-after yang secara eksplisit menghubungkan kondisi awal lereng kritis dengan diagnosis akar penyebab hidrologi dan geoteknik, paket intervensi terpadu, dan capaian faktor keamanan pascaperbaikan. Banyak studi berfokus pada pemodelan atau satu metode perbaikan, sedangkan keputusan operasional di lapangan sering memerlukan kombinasi beberapa tindakan sekaligus. Selain itu, variabilitas kondisi permukaan dan material menuntut disiplin pengukuran serta interpretasi statistik yang konsisten; prinsip karakterisasi variabilitas permukaan dalam studi rekayasa lain menunjukkan pentingnya tidak mengandalkan satu observasi tanpa konteks pengukuran yang memadai (Patihawa et al., 2019).

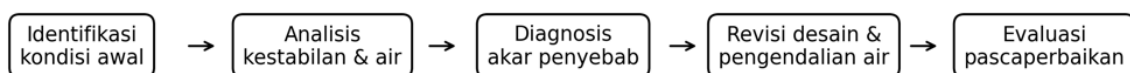
Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi teknis atas peningkatan kestabilan lereng yang mengintegrasikan revisi desain geometri, pengendalian rembesan, dan optimalisasi sistem drainase. Kondisi awal menunjukkan faktor keamanan 1,022 pada Section A dan 1,011 pada Section B, dengan probabilitas kelongsoran 35,7% dan 49,0%. Tujuan

penelitian adalah menjelaskan hubungan antara penyebab ketidakstabilan yang teridentifikasi, tindakan perbaikan yang diterapkan, dan perubahan tingkat kestabilan setelah implementasi. Kebaruan praktis penelitian terletak pada kerangka keputusan terintegrasi yang menempatkan geometri, air, kondisi material, dan keandalan drainase sebagai satu sistem pengendalian risiko, bukan sebagai variabel yang ditangani secara terpisah.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan desain evaluatif teknik dengan pendekatan before-after pada lereng tambang yang mengalami kondisi kritis. Objek evaluasi terdiri atas Section A dan Section B. Data utama berasal dari pengamatan kondisi lapangan, hasil analisis kestabilan lereng yang tersedia, serta pemeriksaan kondisi drainase dan rembesan pada area penelitian. Variabel keluaran utama adalah faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK) pada kondisi awal, sedangkan evaluasi pascaperbaikan menggunakan pencapaian target FK lebih besar dari 1,30 sebagai indikator keberhasilan teknis. Penelitian tidak melibatkan peserta manusia atau hewan sehingga tidak memerlukan persetujuan etik penelitian subjek; seluruh data yang digunakan merupakan data teknis operasi dan observasi kondisi fisik.

Prosedur analisis dilakukan secara berurutan melalui enam tahapan. Pertama, kondisi awal lereng dikarakterisasi dengan mencatat FK dan PK tiap section. Kedua, observasi lapangan digunakan untuk memetakan manifestasi ketidakstabilan, terutama longsor pada area pembentukan sidewall, genangan air di bench akibat rembesan, keberadaan material bekas timbunan yang mudah bergerak, serta tertutupnya jalur drainase oleh material longsor. Ketiga, temuan dikelompokkan ke dalam faktor geometri, hidrologi, material, dan fungsi infrastruktur. Keempat, tindakan perbaikan disusun dengan menghubungkan setiap penyebab dengan mekanisme kontrol yang relevan, yaitu revisi geometri, pengendalian rembesan, pemulihan/optimalisasi drainase, dan monitoring. Kelima, tindakan diimplementasikan pada area prioritas. Keenam, kondisi pascaperbaikan dievaluasi dengan membandingkan tingkat kestabilan terhadap kondisi awal dan target operasional. Karena data ringkas sumber tidak memuat parameter kuat geser, muka air tanah, dimensi detail lereng, maupun nilai FK final per section, penelitian ini tidak mengarang parameter tersebut dan membatasi interpretasi pada indikator yang tersedia. Alur prosedur ditunjukkan pada Gambar 1.



Alur evaluasi teknik berbasis kondisi lapangan, hasil analisis kestabilan, drainase, dan rembesan

Gambar 1. Alur evaluasi teknis peningkatan kestabilan lereng.

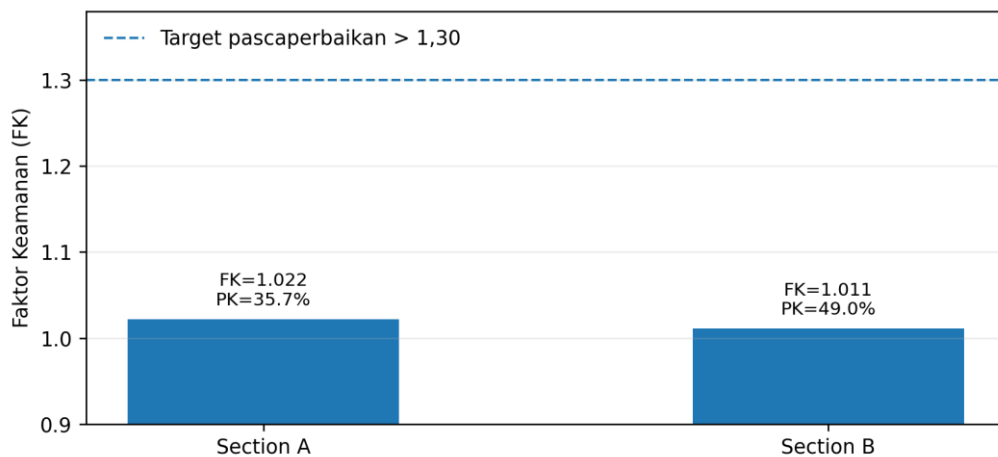
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi awal menunjukkan kedua section berada pada tingkat kestabilan yang memerlukan tindakan korektif. Section A memiliki FK 1,022 dengan PK 35,7%, sedangkan Section B memiliki FK 1,011 dengan PK 49,0%. Selisih FK antarseksi kecil, tetapi perbedaan probabilitas kelongsoran menunjukkan bahwa risiko tidak dapat dibaca hanya dari satu nilai deterministik. Section B menjadi prioritas lebih tinggi karena memiliki FK paling rendah dan

PK paling besar. Ringkasan kondisi awal disajikan pada Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 1. Kondisi awal kestabilan lereng pada area penelitian.

Section	Faktor Keamanan (FK)	Probabilitas Kelongsoran (PK)	Interpretasi awal
A	1,022	35,7%	Kritis; memerlukan pengendalian
B	1,011	49,0%	Kritis; prioritas intervensi lebih tinggi



Gambar 2. Faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran kondisi awal; garis putus-putus menunjukkan target FK pascaperbaikan >1,30.

Observasi lapangan mengidentifikasi empat kelompok masalah yang saling berinteraksi. Pertama, terdapat longsor pada area pembentukan lereng sidewall yang mengindikasikan geometri aktual tidak lagi bekerja dalam kondisi yang diharapkan. Kedua, genangan air ditemukan pada bench dan dikaitkan dengan rembesan. Ketiga, terdapat material bekas timbunan yang relatif mudah mengalami pergerakan. Keempat, sebagian sistem drainase kehilangan fungsi karena tertutup material longsor. Kombinasi tersebut membentuk siklus umpan balik negatif: longsor menutup drainase, drainase yang tidak berfungsi meningkatkan akumulasi air, dan peningkatan keberadaan air memperburuk kondisi material serta kestabilan lereng.

Tabel 2. Diagnosis faktor penyebab dan hubungan dengan tindakan pengendalian.

Faktor teridentifikasi	Indikasi lapangan	Konsekuensi terhadap kestabilan	Tindakan utama
Geometri sidewall	Longsor pada area pembentukan lereng	Distribusi gaya dan tahanan lereng tidak lagi optimal	Revisi desain geometri
Rembesan	Genangan pada bench	Meningkatkan kejenuhan dan potensi tekanan air pori	Pengendalian rembesan
Material bekas timbunan	Material mudah bergerak	Meningkatkan kerentanan deformasi lokal	Penataan dan pengendalian material

Faktor teridentifikasi	Indikasi lapangan	Konsekuensi terhadap kestabilan	Tindakan utama
Drainase	Saluran tertutup material longsor	Air tertahan/teralihkan ke area kritis	Pemulihan dan optimalisasi drainase

Program perbaikan dilaksanakan sebagai paket intervensi, bukan tindakan tunggal. Revisi geometri diarahkan untuk mengurangi kondisi kritis pada lereng yang telah mengalami perubahan akibat longsor. Pengendalian rembesan dan optimalisasi drainase ditujukan untuk mengurangi keberadaan air pada bench serta memastikan limpasan memiliki jalur keluar yang efektif. Monitoring digunakan untuk memastikan perubahan kondisi dapat dikenali setelah intervensi. Berdasarkan evaluasi pascaperbaikan, faktor keamanan meningkat hingga melampaui 1,30. Data ringkas yang tersedia tidak mencantumkan angka akhir per section maupun PK pascaperbaikan, sehingga hasil disajikan secara konservatif sebagai pencapaian target FK >1,30 tanpa memberikan nilai yang tidak terdokumentasi.

Tabel 3. Perbandingan kondisi awal dan kondisi pascaperbaikan.

Indikator	Section A	Section B	Status evaluasi
FK kondisi awal	1,022	1,011	Di bawah target
PK kondisi awal	35,7%	49,0%	Risiko signifikan
Intervensi	Revisi geometri + kontrol air + drainase	Revisi geometri + kontrol air + drainase	Terpadu
FK pascaperbaikan	>1,30*	>1,30*	Target tercapai

*Catatan: sumber data ringkas menyatakan FK setelah perbaikan mencapai lebih dari 1,30; nilai final spesifik tiap section tidak tersedia, sehingga tidak ditampilkan sebagai angka eksak.

Prioritas Risiko dan Verifikasi Tindakan

Prioritas pengendalian disusun dengan prinsip bahwa section dengan kombinasi faktor keamanan lebih rendah, probabilitas longsor lebih tinggi, serta bukti gangguan air dan drainase harus menerima perhatian lebih dahulu. Dengan data yang tersedia, Section B memiliki prioritas relatif lebih tinggi daripada Section A karena FK-nya lebih rendah dan PK-nya lebih besar. Namun, prioritas lapangan tidak boleh ditentukan hanya dari dua angka tersebut. Konsekuensi terhadap jalan angkut, alat, personel, dan fasilitas di bawah lereng perlu dibaca bersama kondisi aktual. Dalam penelitian ini, prioritas intervensi diwujudkan dengan menghubungkan manifestasi lapangan dengan tindakan yang dapat diverifikasi setelah implementasi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Matriks prioritas tindakan dan indikator verifikasi lapangan.

Masalah prioritas	Tindakan	Indikator verifikasi	Frekuensi kontrol yang disarankan
Longsor/ketidaksesuaian geometri	Revisi geometri dan penataan area	Tidak ada perkembangan longsor baru; geometri sesuai desain	Setelah pekerjaan dan pascahunjian signifikan

Masalah prioritas	Tindakan	Indikator verifikasi	Frekuensi kontrol yang disarankan
Rembesan pada bench	Pengendalian jalur rembesan dan pembuangan	Titik rembesan terpetakan; tidak terjadi akumulasi genangan	Inspeksi rutin dan pascahujan
Drainase tertutup	Pembersihan, pemulihan, dan optimasi saluran	Aliran kontinu; tidak ada sumbatan material	Rutin selama operasi
Material mudah bergerak	Penataan material dan pembatasan gangguan	Tidak ada deformasi lokal yang berkembang	Sesuai perubahan aktivitas operasi
Risiko residu	Monitoring dan evaluasi ulang kestabilan	FK tetap di atas target; indikator lapangan stabil	Berkala dan saat kondisi berubah

Matriks tersebut sengaja membedakan tindakan dan indikator verifikasi. Dalam praktik, intervensi geoteknik sering dianggap selesai ketika pekerjaan konstruksi selesai, padahal keberhasilannya baru dapat dinilai apabila mekanisme risiko yang dituju benar-benar berkurang. Sebagai contoh, pembersihan drainase tidak cukup dinyatakan berhasil hanya karena saluran terbuka; aliran perlu diamati untuk memastikan air tidak kembali tertahan di bench atau menggerus area sensitif. Demikian pula, revisi geometri harus diverifikasi melalui kondisi aktual pascapekerjaan dan perkembangan deformasi, bukan hanya kesesuaian gambar desain. Pendekatan verifikasi ini memperkuat hubungan antara desain, implementasi, dan monitoring.

Temuan utama penelitian adalah bahwa peningkatan kestabilan tidak dapat dijelaskan oleh satu tindakan tunggal. Kondisi awal memperlihatkan dua hal sekaligus: FK yang sangat dekat dengan kondisi batas dan PK yang cukup tinggi. Hal ini sejalan dengan argumentasi bahwa desain lereng tambang sebaiknya tidak hanya bergantung pada nilai faktor keamanan deterministik. Afasedanya (2025), Rusni et al. (2019), Masri et al. (2024), dan Pratama (2021) menempatkan analisis probabilitas atau risiko sebagai pelengkap penting karena ketidakpastian parameter geoteknik dapat menghasilkan tingkat risiko yang berbeda walaupun FK tampak serupa. Pada kasus ini, perbedaan PK antara Section A dan Section B memperkuat alasan untuk memprioritaskan Section B pada tahap pengendalian dan monitoring.

Hubungan antara genangan bench, rembesan, dan fungsi drainase memberikan penjelasan mekanistik terhadap ketidakstabilan. Pada lereng tambang, air berpotensi mengubah kondisi tegangan efektif dan kekuatan geser, sehingga perubahan hidrologi perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kestabilan. Akbar et al. (2025) secara khusus menempatkan hujan sebagai variabel dalam analisis numerik lereng timbunan, sedangkan Romadhoni et al. (2021) menunjukkan pentingnya kualitas data curah hujan dalam analisis hidrologi. Temuan lapangan pada penelitian ini memperluas argumen tersebut pada tingkat operasional: bukan hanya besarnya hujan yang penting, tetapi juga apakah infrastruktur lokal mampu mengalirkannya dan apakah rembesan tetap terkendali setelah geometri lereng berubah.

Optimalisasi drainase berfungsi sebagai kontrol geoteknik tidak langsung. Ketika saluran tertutup material longsor, air kehilangan jalur pengaliran dan cenderung membentuk genangan atau mengalir ke zona yang tidak direncanakan. Prinsip pengendalian genangan pada jaringan drainase menekankan kebutuhan untuk mengevaluasi kapasitas, kontinuitas aliran,

dan titik hambatan (Sunaryo et al., 2026; Kurniawan et al., 2026). Pada kasus tambang, konsep yang sama diterjemahkan menjadi inspeksi bench, pembukaan kembali saluran yang tertutup, pengaturan arah limpasan, dan pencegahan masuknya air ke zona lereng yang rentan. Kerangka infrastruktur berkelanjutan yang lintas bidang juga relevan karena keputusan geoteknik perlu dikombinasikan dengan hidrologi, konstruksi saluran, dan operasi tambang (Supit et al., 2025).

Revisi geometri tetap menjadi komponen utama karena bentuk lereng menentukan distribusi gaya penggerak dan tahanan. Studi pada tambang terbuka dan area penataan kembali menunjukkan bahwa perubahan desain dapat meningkatkan margin kestabilan apabila disusun berdasarkan kondisi geoteknik aktual (Prabowo et al., 2022; Simbolon et al., 2020; Wilson, 2024). Pada lereng yang telah mengalami longsor, analisis balik dapat memberikan informasi yang lebih representatif mengenai mekanisme kegagalan dan membantu merancang tindakan yang tidak hanya mengembalikan bentuk awal tetapi membangun geometri yang lebih toleran terhadap kondisi aktual (Selsabeel et al., 2021). Penelitian Muwaffaqi (2025) tentang redesign timbunan pascalongsor memperkuat pentingnya desain ulang sebagai respons terhadap kondisi lapangan, bukan sekadar penerapan geometri rencana secara kaku.

Material bekas timbunan yang mudah bergerak menjadi faktor yang memerlukan perhatian tersendiri. Timbunan dapat memiliki heterogenitas, struktur internal, dan respons terhadap air yang berbeda dari material in-situ. Ashar et al. (2025) menggunakan metode Fellenius pada overburden lempung untuk menilai kestabilan, sementara Suparno et al. (2025) menyoroti bahwa aktivitas alat berat dan peledakan juga dapat memengaruhi stabilitas lereng timbunan. Hal ini berarti pengelolaan area perbaikan tidak berhenti pada reshaping; kontrol beban operasional, penempatan material, dan kondisi kadar air perlu dipantau secara konsisten. Bila diperlukan pada kondisi tertentu, penguatan seperti geogrid dapat menjadi alternatif tambahan, sebagaimana dikaji Laksono dan Prihatiningsih (2025), namun kebutuhan tersebut harus ditentukan dari data geoteknik yang memadai.

Pencapaian FK di atas 1,30 setelah intervensi memperlihatkan manfaat pendekatan terpadu, tetapi angka tersebut tidak boleh dipisahkan dari kualitas sistem pengendalian setelah konstruksi. Drainase dapat kembali tertutup, rembesan dapat berpindah, dan geometri dapat berubah akibat aktivitas produksi. Karena itu, monitoring harus diposisikan sebagai bagian dari desain, bukan tahap tambahan. Penggunaan slope stability radar pada operasi tambang menunjukkan bagaimana pemantauan deformasi dapat digunakan untuk mengendalikan risiko secara dinamis (Simamora, 2020). Pada lokasi yang belum menggunakan pemantauan radar, inspeksi visual terstruktur, pemetaan retakan, pengamatan debit/rembesan, dan pemeriksaan fungsi saluran tetap penting sebagai sistem peringatan operasional.

Temuan juga memiliki implikasi bagi perencanaan tambang dan infrastruktur pendukung. Wibowo et al. (2022) membahas analisis kestabilan dalam konteks design life of mine dan potensi sharing wall, sedangkan Wibowo dan Hermawan (2025) menempatkan kestabilan sebagai salah satu pertimbangan ketika optimasi cadangan dilakukan dekat sungai. Kedua konteks tersebut menunjukkan bahwa margin kestabilan tidak hanya berkaitan dengan keselamatan lereng lokal, tetapi dapat membatasi pilihan tata letak, akses, pemanfaatan cadangan, dan umur layanan infrastruktur. Dengan kata lain, perbaikan lereng yang berhasil dapat menghasilkan nilai operasional yang lebih luas ketika dipadukan dengan perencanaan tambang dan manajemen air.

Perspektif pascatambang memperkuat kebutuhan integrasi. Panrita (2025) membahas rancangan reklamasi lahan bekas disposal, sementara Supriyanto et al. (2026) mengaitkan pengelolaan limbah cair pascatambang dengan stabilitas geoteknik. Kedua sumber tersebut mendukung gagasan bahwa sistem drainase, geometri, dan pengelolaan material harus memiliki kontinuitas dari fase operasi hingga penutupan. Program 4P dalam pengendalian Lumpur Sidoarjo pengaliran, peralatan, perkuatan, dan penataan juga menunjukkan pola intervensi multi-komponen pada masalah geoteknik-hidrolik yang kompleks (Inayatullah & Prabawati, 2025). Pada penelitian ini, logika serupa terlihat dalam kombinasi revisi desain, pengendalian rembesan, pemulihan drainase, dan monitoring.

Relevansi interdisipliner penelitian dapat dilihat dari prinsip pengelolaan sistem. Kajian sanitasi lingkungan dan limbah peternakan menempatkan pemisahan aliran, penampungan, pemeliharaan, dan pengendalian sumber sebagai komponen yang menentukan keberhasilan pengelolaan lingkungan (Charisma et al., 2025; Sari et al., 2024). Di bidang transportasi, hubungan manajemen rekayasa lalu lintas dengan kemacetan dan keselamatan menegaskan bahwa kapasitas infrastruktur dan pola aliran harus dibaca sebagai satu sistem (Indonesia-STTD & Bali, 2022), sedangkan pengantar rekayasa sipil menempatkan integrasi berbagai subdisiplin sebagai fondasi penyelesaian masalah infrastruktur (Matana et al., 2025). Analogi ini penting karena air pada lereng juga merupakan aliran yang harus diarahkan; ketika jalurnya terganggu, beban dialihkan ke bagian sistem yang tidak dirancang untuk menerimanya.

Dari sisi metodologis, penelitian ini menekankan pembacaan data teknis secara terstruktur. Patihawa et al. (2019) menunjukkan penggunaan analisis statistik untuk menilai variasi kekasaran dan profil permukaan pada konteks pemersinan; meskipun objeknya berbeda, prinsip bahwa variasi karakteristik fisik perlu diukur dan tidak cukup diwakili oleh satu observasi relevan bagi monitoring lereng. Untuk pengembangan berikutnya, pendekatan probabilistik dapat diperkuat dengan distribusi parameter kuat geser, muka air tanah, data deformasi temporal, dan kondisi hujan yang telah dikoreksi bias. Hal ini akan memungkinkan evaluasi PK pascaperbaikan, bukan hanya FK, sehingga efektivitas intervensi dapat dinilai secara lebih komprehensif.

Gambar 3 merangkum kontribusi konseptual penelitian. Kerangka tersebut menunjukkan dua jalur penyebab utama geometri/material dan air/drainase yang bertemu pada kondisi kestabilan rendah. Intervensi kemudian diarahkan pada masing-masing jalur secara serempak. Dibandingkan strategi yang hanya memperbaiki geometri, kerangka ini mengurangi kemungkinan bahwa lereng yang telah dibentuk ulang kembali kehilangan kestabilan akibat rembesan atau drainase yang gagal berfungsi. Dibandingkan strategi yang hanya mengalirkan air, kerangka ini tetap mengakui bahwa geometri dan kondisi material merupakan komponen mendasar yang harus memenuhi kriteria desain.

Secara praktis, penelitian ini menghasilkan urutan keputusan yang dapat diterapkan pada area tambang lain: identifikasi indikator kestabilan; verifikasi manifestasi lapangan; pisahkan penyebab menjadi geometri, air, material, dan infrastruktur; hubungkan setiap penyebab dengan tindakan koreksi; implementasikan tindakan secara terkoordinasi; kemudian ukur kembali indikator kestabilan dan pastikan sistem drainase tetap berfungsi. Urutan ini tidak menggantikan analisis geoteknik rinci, tetapi membantu mencegah tindakan parsial yang hanya menangani gejala. Dalam praktik risk management, pendekatan tersebut juga memungkinkan

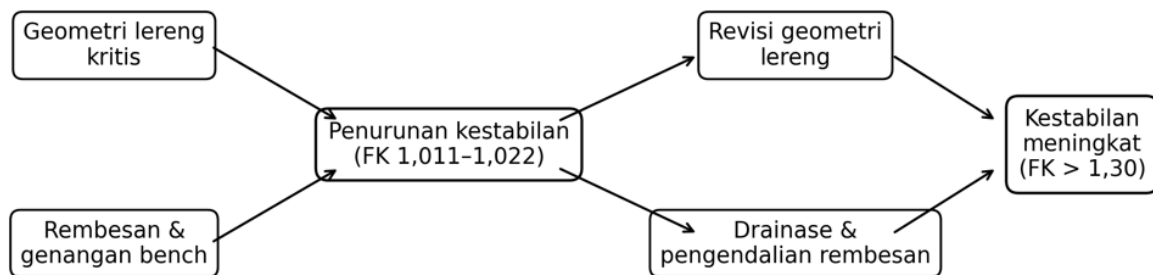
alokasi sumber daya difokuskan pada section dengan kombinasi FK rendah, PK tinggi, dan konsekuensi operasional besar.

Keterbatasan penelitian perlu ditegaskan. Data ringkas yang tersedia tidak memuat parameter kuat geser material, muka air tanah, geometri rinci sebelum dan sesudah redesign, metode analisis numerik/keseimbangan batas yang digunakan, nilai FK final per section, maupun PK setelah perbaikan. Karena itu, artikel ini tidak melakukan rekalkulasi numerik dan tidak mengklaim besar kontribusi individual dari setiap intervensi. Capaian $>1,30$ dibaca sebagai hasil paket perbaikan secara keseluruhan. Penelitian selanjutnya perlu mendokumentasikan parameter geoteknik, model aliran air tanah, curah hujan terkalibrasi, perubahan geometri, dan deformasi temporal agar efektivitas masing-masing komponen dapat dipisahkan serta diuji dengan sensitivitas dan probabilitas.

Salah satu implikasi penting dari hasil penelitian adalah perlunya memisahkan antara target desain dan indikator kondisi. $FK >1,30$ merupakan target numerik yang berguna untuk mengevaluasi margin kestabilan, tetapi indikator lapangan seperti rembesan baru, genangan persisten, retakan tarik, material jatuhan, atau sumbatan drainase dapat muncul sebelum perubahan FK dihitung ulang. Karena itu, pengelolaan risiko harus menggunakan dua lapisan kontrol: lapisan analitis melalui pembaruan analisis kestabilan ketika parameter atau geometri berubah, dan lapisan observasional melalui inspeksi rutin. Pendekatan berlapis tersebut konsisten dengan prinsip bahwa probabilitas dan konsekuensi perlu dipertimbangkan bersama nilai deterministik pada desain lereng tambang.

Pada tahap perencanaan, integrasi geoteknik dan hidrologi juga dapat mengurangi pekerjaan ulang. Jika geometri diperbaiki tanpa menata aliran air, rembesan dan limpasan berpotensi mengembalikan lereng pada kondisi yang tidak menguntungkan. Sebaliknya, drainase yang baik tidak dapat mengompensasi geometri yang secara mekanik tidak memadai. Oleh sebab itu, sequence pekerjaan ideal dimulai dari pengamanan area, pengendalian air sementara, pembentukan geometri baru, pembangunan atau pemulihan saluran permanen, penataan material, dan kemudian verifikasi. Sequence ini perlu disesuaikan dengan akses alat, kondisi cuaca, dan risiko pekerjaan sehingga tindakan perbaikan tidak justru menambah beban atau mengganggu kaki lereng.

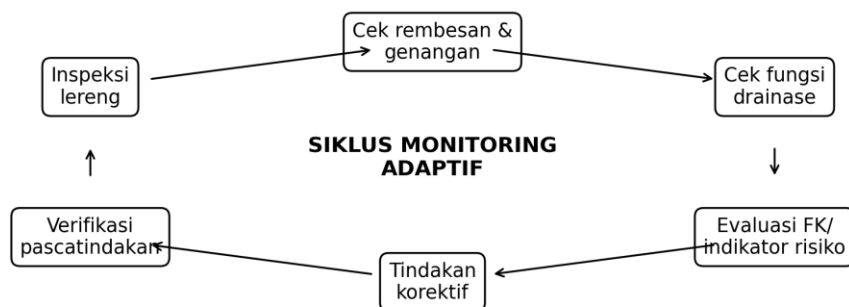
Keterkaitan tersebut memberi kontribusi praktis terhadap budaya pengambilan keputusan di operasi tambang. Data geoteknik sering berada pada tim geoteknik, data drainase pada tim sipil atau dewatering, sedangkan perubahan geometri dan aktivitas alat berada pada tim operasi. Kerangka penelitian ini menuntut pertukaran data antarfungsi karena penyebab kegagalan dapat melintasi batas organisasi. Konsep kolaborasi lintas bidang dalam infrastruktur berkelanjutan (Supit et al., 2025) relevan pada titik ini: efektivitas intervensi tidak hanya dipengaruhi kualitas perhitungan, tetapi juga koordinasi implementasi dan pemeliharaan.



Kerangka integrasi geoteknik-hidrologi yang digunakan untuk membaca hubungan penyebab dan intervensi

Gambar 3. Kerangka integrasi revisi geometri, pengendalian rembesan, dan optimalisasi drainase.

Setelah kondisi pascaperbaikan memenuhi target, risiko tidak menjadi nol. Perubahan cuaca, gangguan alat berat, erosi, penumpukan material, dan degradasi saluran dapat membentuk risiko baru. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan siklus monitoring adaptif sebagaimana Gambar 4. Siklus dimulai dari inspeksi kondisi lereng dan air, dilanjutkan pemeriksaan fungsi drainase, evaluasi indikator kestabilan, tindakan korektif bila diperlukan, dan verifikasi pascatindakan. Dengan pola ini, data lapangan secara langsung kembali ke proses keputusan sehingga pengelolaan lereng bersifat iteratif.



Gambar 4. Siklus monitoring adaptif untuk mempertahankan kestabilan pascaperbaikan.

Tabel 5. Posisi temuan penelitian terhadap literatur yang digunakan.

Tema	Temuan penelitian	Dukungan literatur	Implikasi
Risiko kestabilan	FK 1,011–1,022 dan PK 35,7–49,0%	Rusni et al. (2019); Afasedanya (2025); Masri et al. (2024)	Gunakan FK dan probabilitas secara komplementer
Air dan hujan	Rembesan dan genangan pada bench	Akbar et al. (2025); Romadhoni et al. (2021)	Masukkan kontrol air ke siklus desain geoteknik
Geometri	Longsor pada sidewall memerlukan redesign	Prabowo et al. (2022); Selsabeel et al. (2021); Muwaffaqi (2025)	Revisi geometri berbasis kondisi aktual

Tema	Temuan penelitian	Dukungan literatur	Implikasi
Drainase	Saluran tertutup material longsor	Sunaryo et al. (2026); Kurniawan et al. (2026)	Keandalan jalur aliran harus dipelihara
Monitoring	Perlu kontrol berkelanjutan setelah intervensi	Simamora (2020)	Monitoring menjadi bagian dari desain risiko

Implikasi Operasional dan Agenda Monitoring

Hasil penelitian dapat diterjemahkan menjadi protokol operasional yang lebih eksplisit. Pada kondisi normal, inspeksi perlu memastikan tiga elemen minimum: bentuk lereng tidak menunjukkan perubahan yang progresif, jalur drainase tetap terbuka dan mampu mengalirkan air, serta titik rembesan tidak memperlihatkan peningkatan debit atau perluasan area basah. Ketika salah satu indikator berubah, inspeksi harus dinaikkan dari pemeriksaan rutin menjadi pemeriksaan terarah yang menghubungkan lokasi anomali dengan geometri, drainase terdekat, dan aktivitas operasi yang sedang berlangsung. Protokol seperti ini penting karena sebagian mekanisme ketidakstabilan berkembang secara bertahap dan dapat dideteksi sebelum tercermin dalam kegagalan makroskopik.

Prioritas perawatan drainase harus diberikan pada bagian yang menerima limpasan dari area luas, saluran yang berada dekat crest atau bench kritis, dan titik yang sebelumnya pernah tertutup material longsor. Pembersihan saluran perlu disertai pemeriksaan outlet agar air tidak sekadar dipindahkan ke lokasi yang lebih rendah namun masih berada dalam zona pengaruh lereng. Jika rembesan muncul setelah hujan, dokumentasi waktu, lokasi, luas zona basah, dan arah aliran perlu dipertahankan secara konsisten. Data sederhana ini dapat membentuk histori yang berguna untuk membedakan rembesan temporer dari perubahan hidrologi yang persisten dan menjadi dasar keputusan apakah diperlukan tindakan drainase tambahan atau pembaruan analisis kestabilan.

Dari sisi geometri, perubahan setelah perbaikan harus dikontrol terhadap kondisi as-built. Perbedaan antara desain dan kondisi aktual dapat muncul karena toleransi pekerjaan, erosi, penumpukan material, atau kebutuhan akses alat. Oleh karena itu, evaluasi pascaperbaikan sebaiknya tidak menggunakan geometri rencana apabila survey aktual menunjukkan perubahan yang berarti. Prinsip yang sama berlaku terhadap kondisi material; area bekas timbunan yang kembali terganggu oleh alat berat dapat mengalami perubahan densitas dan struktur, sehingga observasi lapangan dan data pengujian perlu diperbarui bila perilakunya berubah. Pendekatan ini menjaga agar model analisis tetap merepresentasikan kondisi yang benar-benar bekerja di lapangan.

Integrasi data juga diperlukan pada tingkat manajemen. Catatan inspeksi geoteknik, data hujan, pekerjaan pembersihan drainase, perubahan desain, dan aktivitas alat sebaiknya disimpan dalam satu alur informasi yang dapat ditelusuri. Dengan demikian, ketika muncul anomali, tim dapat melihat urutan kejadian dan tidak menilai setiap indikator secara terisolasi. Sistem informasi semacam ini mendukung evaluasi risiko yang lebih cepat, mengurangi pengulangan masalah, dan memperkuat pembelajaran operasional. Dalam konteks keselamatan, manfaat terbesarnya adalah kemampuan untuk mengidentifikasi kondisi memburuk sebelum diperlukan penghentian operasi yang lebih luas.

Agenda monitoring yang diusulkan bersifat adaptif. Frekuensi dasar dapat mengikuti prosedur operasi setempat, tetapi harus meningkat ketika terjadi hujan signifikan, perubahan geometri, aktivitas penambangan dekat lereng, kemunculan retakan atau rembesan baru, serta setelah pekerjaan perbaikan drainase. Apabila instrumen deformasi tersedia, tren pergerakan perlu dibaca bersama indikator visual dan hidrologi, bukan secara terpisah. Jika tidak tersedia, konsistensi inspeksi visual, pengukuran sederhana, dan dokumentasi fotografis dari titik yang sama tetap dapat meningkatkan kualitas keputusan. Intinya, pencapaian $FK > 1,30$ harus dipandang sebagai awal fase pengendalian pascaperbaikan, bukan akhir dari proses pengelolaan risiko.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakstabilan lereng pada area kajian merupakan hasil interaksi antara kondisi geometri, rembesan dan genangan pada bench, karakter material bekas timbunan, serta penurunan fungsi drainase akibat tertutup material longsor. Kondisi awal memperlihatkan FK 1,022 pada Section A dan 1,011 pada Section B, dengan PK masing-masing 35,7% dan 49,0%, sehingga kedua section memerlukan tindakan korektif dan Section B memiliki prioritas risiko lebih tinggi. Paket perbaikan yang menggabungkan revisi geometri, pengendalian rembesan, optimalisasi drainase, dan monitoring meningkatkan faktor keamanan hingga melampaui target operasional 1,30. Kontribusi utama penelitian adalah menegaskan bahwa stabilisasi lereng tambang sebaiknya diperlakukan sebagai siklus geoteknik-hidrologi terpadu: geometri mengendalikan konfigurasi mekanik lereng, sedangkan air dan keandalan drainase menentukan apakah konfigurasi tersebut dapat mempertahankan kinerjanya selama operasi. Implikasi praktisnya adalah bahwa keputusan perbaikan tidak cukup berhenti pada reshaping; sistem pengaliran dan rembesan harus dipulihkan dan dipantau secara berkelanjutan. Keterbatasan data mencegah pemisahan kontribusi kuantitatif setiap intervensi serta evaluasi PK pascaperbaikan. Penelitian selanjutnya perlu memasukkan geometri rinci, parameter kuat geser, muka air tanah, data hujan terkalibrasi, dan deformasi temporal untuk membangun evaluasi probabilistik pascaperbaikan serta menguji sensitivitas masing-masing komponen intervensi.

REFERENSI

- Afasedanya, M. M. T. (2025). Stability of open mine slope using the limit equilibrium method and risk analysis to support mining infrastructure planning. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, 8(2), 35–41. <https://doi.org/10.56139/intan.v8i2.316>
- Akbar, W. N., Dwinagara, B., Saptono, S., Haq, S. R., Lusantono, O. W., & Prabandaru, P. D. (2025). Analisis metode numerik pengaruh hujan terhadap kestabilan lereng tunggal timbunan di tambang terbuka batubara. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 21(1), 19–32. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol21.No1.2025.1599>
- Ashar, A., Usman, I., Abriansyah, A., Amin, F., Shaddad, A. R., & Aldiyansyah, A. (2025). Analisis kestabilan lereng pada overburden lempung menggunakan metode Fellenius: Studi kasus Blok Parasi PT. Wijaya Inti Nusantara Kabupaten Konawe Selatan. *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 5(2), 032–037. <https://doi.org/10.51454/teluk.v5i2.1555>
- Charisma, F. D., Khoiron, K., Nurika, G., & Maulana, K. (2025). Sanitasi lingkungan di kawasan ekowisata bahari Kampung Blekok Kabupaten Situbondo. *Sehat Rakyat: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(3), 597–614. <https://doi.org/10.54259/sehatrakyat.v4i3.5080>

- Inayatullah, S. I., & Prabawati, I. (2025). Evaluasi program pengendalian Lumpur Sidoarjo melalui 4P (pengaliran, peralatan, perkuatan, dan penataan) di Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo. *Socius: Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Sosial*, 2(12). <https://doi.org/10.5281/zenodo.16417735>
- Indonesia-STTD, P. T. D., & Bali, P. T. D. (2022). Hubungan manajemen rekayasa lalu lintas dengan kemacetan, serta keselamatan. *Laik Fungsi Jalan*, 17.
- Kurniawan, I., Salamah, N., Fikri, A. Y., Febrianti, S., & Halim, A. (2026). Optimisasi sistem drainase sebagai strategi penanggulangan banjir kiriman air dari wilayah hulu di Kelurahan Nyunyai, Kecamatan Rajabasa. *Jurnal Ilmu Pendidikan Pancasila, Kewarganegaraan, dan Hukum*, 3(2), 11–17. <https://doi.org/10.70134/pakehum.v3i2.1655>
- Laksono, P. A., & Prihatiningsih, A. (2025). Studi pengaruh perkuatan tanah menggunakan geogrid pada stabilitas lereng. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 291–298. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i1.33252>
- Masri, M., Mili, M. Z., Nafiu, W. R. A., Wahab, W., Agriawan, H., & Ngkoimani, L. O. (2024). Potensi dan probabilitas kelongsoran lereng tambang kuari batugamping di daerah Moramo Utara, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 20(2), 51–63. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol20.No2.2024.1550>
- Matana, H., Syukuriah, S. T., Patah, E. I. D., Amahoru, B., Ari Kusuma, S. T., Patasik, D. F., et al. (2025). Pengantar rekayasa sipil. *Arsy Media*.
- Muwaffaqi, H. (2025). Analisis kestabilan lereng timbunan pada redesign lereng pasca longsoran jalan hauling PT X KM 78 di Kalimantan Timur. *Journal PEP Bandung*, 2(1), 13–29. <https://doi.org/10.65706/gm.v2i1.14>
- Panrita, N. S. (2025). Rancangan teknis reklamasi lahan bekas disposal area Triple A DSP 2024 PT Vale Indonesia Tbk [Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin].
- Patihawa, A., Ibrahim, G. A., Hamni, A., Supriyadi, E. A., & Saputra, E. (2019, September). Analisa statistik nilai kekasaran permukaan dan profil permukaan Ti 6AL-4V ELI pada pemesinan micro-milling. *Prosiding Seminar*, 93.
- Prabowo, B., Setiawan, H., & Indrawan, I. G. B. (2022). Analisis kestabilan lereng tambang terbuka Blok A sisi timur Daerah Tanjung Lalang, Kecamatan Tanjung Agung, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. *Jurnal Sosial Teknologi*, 2(1), 58–71. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v2i1.289>
- Pratama, I. T. (2021). Studi stabilitas lereng clay shale di Kalimantan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas dan pendekatan probabilistik dan deterministik. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 4(2), 103–113.
- Romadhoni, A. Z., Wulandari, D. A., & Suharyanto, S. (2021). Koreksi bias data curah hujan satelit dengan pendekatan quantile mapping. *Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) HATHI Ke-38*, 709–718.
- Rusni, S. O., Sophian, R. I., & Zakaria, Z. (2019). Probabilitas longsor pada lereng tambang batubara terbuka sisi sidewall selatan Pit X, Kalimantan Selatan. *Geoscience Journal*, 3(5), 389–396.
- Sari, S. P., Permana, I., Hutabarat, A. L. R., Sari, D., Nurtanti, I., Azis, A. R., & Vertygo, S. (2024). Pengelolaan pengelolaan limbah peternakan peternakan.
- Selsabeel, S., Widiarso, D. A., & Trisnawati, D. (2021). Analisis balik stabilitas lereng tambang dan rekomendasi rekayasa keteknikannya, studi kasus: Area Low Wall Pit Y Blok 4900-550 Strip 3500-4300 PT. Pamapersada Nusantara Site PT. Adaro Indonesia. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(3), 142–150. <https://doi.org/10.14710/jgt.4.3.2021.142-150>
- Simamora, C. (2020). Optimasi penambangan batubara menggunakan kontrol slope stability radar di Pit C1 Blok 8 Binungan Mine Operation Area 2 PT Berau Coal.
- Simbolon, K., Jati, S. N., & Ersyari, J. (2020). Rekayasa geometri desain lereng berdasarkan

- analisis nilai faktor keamanan Pit Tambang Air Laya Utara PT Bukit Asam Tbk. Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI, 107–118.
- Sunaryo, S., Abdulgani, H., & Simanjuntak, M. J. (2026). Analisis pengendalian genangan pada sistem drainase perkotaan menggunakan Environmental Protection Agency Storm Water Management Model. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 12(1). <https://doi.org/10.31943/jri.v12i1.325>
- Suparno, F. A. D., et al. (2025). Pengaruh aktifitas alat berat dan peledakan terhadap stabilitas lereng timbunan tambang batubara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 31(2), 194–202. <https://doi.org/10.14710/mkts.v31i2.69177>
- Supit, C. J., Oroh, F. M., Sumarauw, J. S. F., Waani, J. E., Riogilang, H., & Riogilang, H. (2025). Infrastruktur berkelanjutan: Kolaborasi lintas bidang teknik sipil. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Supriyanto, B., Syaputra, R., & Nafisah, L. A. (2026). Sliding pad sebagai solusi pengelolaan limbah cair pascatambang: Evaluasi dampak lingkungan dan stabilitas geoteknik di bekas void tambang batubara Kalimantan Timur. *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 26(1), 191–205. <https://doi.org/10.36275/1mdk2g38>
- Wibowo, J., & Hermawan, S. (2025). Optimasi cadangan batubara pada area dekat sungai. *Jurnal Dimensi Insinyur Profesional*, 3(2), 15–25. <https://doi.org/10.9744/jdip.3.1.15-25>
- Wibowo, W., & Nurhakim, N. (2022). Kajian teknis design life of mine (LOM) tambang dengan potensi kerjasama sharing wall project melalui pendekatan analisis kestabilan lereng. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 11(01), 7–20. <https://doi.org/10.20527/jtb.v11i01.208>
- Wilson, W. N. (2024). Desain geometri disposal untuk kegiatan penataan kembali bekas penambangan Pit Bukit 20 pada PT. Putra Mekongga Sejahtera Kecamatan Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 97–104. <https://doi.org/10.34151/technoscientia.v16i2.4629>