



DOI: <https://doi.org/10.38035/jgit.v4i1.851>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Integrasi Metode Geofisika dan Regulasi Keselamatan dalam Identifikasi Risiko Geohazard pada Kegiatan Pertambangan

Lidya Agustin¹, Putri Mulyani²

¹Universitas Jambi, Jambi, Indonesia, lidyaagstn21@gmail.com

²Universitas Jambi, Jambi, Indonesia, putrimancung25@gmail.com

Corresponding Author: lidyaagstn21@gmail.com¹

Abstract: Mining alters slopes, groundwater, and rock mass stress, so landslides, rockfalls, subsidence, and hidden fracture zones persistently threaten worker safety and operations. Geophysical studies have shown strong capability in imaging sliding surfaces, saturated zones, voids, and surface deformation, while legal studies on Indonesian mining safety mostly discuss normative obligations and worker protection. The research gap lies in the absence of a systematic link that carries geophysical findings into risk assessment, safety obligations, mitigation, and regulatory compliance. This study aims to analyze the use of geophysical methods for identifying geohazard risk in mining, the regulation of geohazard-related risk under Indonesian mining safety law, and a framework that integrates both. The study combines a structured literature review of geophysics with a normative juridical analysis of mining and occupational safety regulations whose legal status was verified. Results show that each geophysical method answers a different hazard question, while current regulations already require risk management, technical studies, slope monitoring, and a mining safety management system but do not specify how geophysical indicators should enter these mechanisms. The **novelty** of this study is an integration matrix and framework that maps geophysical indicators to risk levels, control obligations, legal bases, and operational implications.

Keyword: Geophysical Methods, Geohazard, Mining Safety, Risk Management, Mining Regulation.

Abstrak: Kegiatan pertambangan mengubah geometri lereng, kondisi air tanah, dan tegangan massa batuan sehingga longsor, jatuhnya batuan, amblesan, dan zona rekahan tersembunyi mengancam keselamatan pekerja dan kelangsungan operasi. Kajian geofisika telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam memetakan bidang gelincir, zona jenuh air, rongga, dan deformasi permukaan, sedangkan kajian hukum keselamatan pertambangan di Indonesia lebih banyak membahas kewajiban normatif dan perlindungan pekerja. Research gap penelitian ini terletak pada belum tersusunnya hubungan sistematis yang membawa temuan geofisika ke dalam penilaian risiko, kewajiban keselamatan, mitigasi, dan kepatuhan regulasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan metode geofisika dalam identifikasi risiko geohazard pertambangan, pengaturan risiko geohazard dalam regulasi keselamatan pertambangan Indonesia, serta kerangka yang mengintegrasikan keduanya. Penelitian deskriptif analitis ini

memadukan kajian literatur terstruktur di bidang geofisika dengan pendekatan yuridis normatif terhadap peraturan pertambangan dan keselamatan kerja yang status berlakunya telah diverifikasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa setiap metode geofisika menjawab pertanyaan bahaya yang berbeda, sementara regulasi yang berlaku sudah mewajibkan manajemen risiko, kajian teknis, pemantauan kestabilan lereng, dan sistem manajemen keselamatan pertambangan, tetapi belum mengatur cara indikator geofisika masuk ke dalam mekanisme tersebut. Novelty penelitian ini berupa matriks dan kerangka integrasi yang memetakan indikator geofisika ke tingkat risiko, kewajiban pengendalian, dasar hukum, dan implikasi operasional.

Kata Kunci: Metode Geofisika, Geohazard, Keselamatan Pertambangan, Manajemen Risiko, Regulasi Pertambangan.

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan terbuka maupun bawah tanah mengubah kondisi geologi secara langsung. Penggalian memotong lereng, peledakan menambah getaran, penimbunan material menambah beban, dan pengeringan tambang mengubah tekanan air pori. Akibatnya, lereng penambangan, lereng timbunan, dan area bekas tambang dapat mengalami longsor, jatuhnya batuan, amblesan, atau deformasi yang berkembang perlahan sebelum gagal secara tiba-tiba. Kajian tinjauan tentang kegagalan lereng tambang menjelaskan bahwa kelongsoran terjadi ketika tegangan geser yang bekerja melampaui kuat geser massa batuan, dan kondisi itu sangat dipengaruhi oleh struktur geologi, air tanah, geometri lereng, serta litologi (Kolapo et al., 2022). Bagi pekerja di lantai tambang dan operator alat berat, kegagalan semacam ini mengancam jiwa sekaligus menghentikan produksi.

Karena sifatnya yang berkembang dari kondisi bawah permukaan, geohazard pertambangan tidak cukup dikenali dari pengamatan visual. Identifikasi perlu dimulai sejak tahap eksplorasi dan perencanaan desain tambang, dilanjutkan selama operasi, dan tetap dipantau pada tahap pascatambang ketika lereng akhir dan timbunan tidak lagi dirawat secara intensif. Keputusan tentang geometri lereng, jarak aman, jalur angkut, dan penempatan fasilitas akan keliru apabila model geologi yang mendasarinya tidak menggambarkan zona lemah yang sebenarnya.

Metode geofisika menawarkan cara melihat kondisi bawah permukaan secara tidak invasif dan dalam cakupan yang lebih luas dibanding pengeboran titik. Geolistrik resistivitas dapat membedakan zona jenuh air dan lapisan lempung yang berpotensi menjadi bidang gelincir, seismik refraksi tomografi memetakan variasi kecepatan gelombang P yang berkaitan dengan tingkat pelapukan dan kekompakan material, sedangkan metode mikrotremor, *Ground Penetrating Radar* (GPR), dan interferometri radar apertur sintetis (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*, InSAR) memberi informasi tentang ketebalan sedimen, rongga dangkal, serta deformasi permukaan (Imani et al., 2021; Pazzi et al., 2019; Whiteley et al., 2019). Di lingkungan tambang, kemampuan tersebut telah dipakai untuk memetakan sesar yang memengaruhi kestabilan lereng, mendeteksi rongga bawah permukaan, dan memantau pergerakan lereng secara berkala (Allam et al., 2025; Andronikidis et al., 2023; Bar & Dixon, 2021).

Masalahnya, hasil survei geofisika sering berhenti sebagai penampang resistivitas, model kecepatan, atau peta deformasi yang hanya dibaca oleh tenaga teknis. Zona resistivitas rendah di belakang muka lereng, misalnya, belum otomatis menjadi keputusan untuk mengubah geometri lereng atau membatasi akses pekerja. Tanpa jalur yang jelas dari temuan teknis ke sistem manajemen keselamatan, informasi bahaya yang sudah tersedia bisa tidak pernah

sampai ke pengambil keputusan yang memiliki kewenangan dan kewajiban hukum untuk bertindak.

Di Indonesia, kewajiban tersebut bersumber dari rezim hukum pertambangan mineral dan batubara serta hukum keselamatan kerja. Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 beserta perubahannya mewajibkan pemegang izin menerapkan kaidah teknik pertambangan yang baik, termasuk ketentuan keselamatan pertambangan (Republik Indonesia, 2009, 2020, 2025a). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 26 Tahun 2018 menjabarkan kewajiban itu ke dalam aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) pertambangan, keselamatan operasi, serta sistem manajemen keselamatan pertambangan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [ESDM], 2018a), sedangkan Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 memuat pedoman teknis tentang geoteknik tambang, kajian hidrogeologi, dan pemantauan kestabilan lereng (Kementerian ESDM, 2018b). Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja tetap menjadi dasar umum perlindungan pekerja di tempat kerja pertambangan (Republik Indonesia, 1970).

Penelitian geofisika untuk geohazard berkembang pesat dalam lima tahun terakhir. Santosa et al. (2024) memakai tomografi resistivitas listrik yang dikalibrasi dengan data bor untuk menentukan bidang gelincir longsoran dalam di ruas jalan tol Cisumdawu, sedangkan Zainal et al. (2021) memakai seismik refraksi tomografi untuk mengenali geometri lapisan pada daerah rawan longsor di Gayo Lues. Di konteks tambang, Maulana et al. (2023) memadukan InSAR diferensial (D-InSAR) dan radar berbasis darat untuk memantau lereng tambang terbuka, Ding et al. (2024) menyusun kriteria peringatan dini berbasis radar aperture riil, dan Zhu et al. (2024) menggabungkan D-InSAR, teknik *Small Baseline Subset* (SBAS), serta citra pesawat nirawak (*unmanned aerial vehicle*, UAV) untuk memantau amblesan di area tambang batubara. Innocenti et al. (2023) bahkan menunjukkan bahwa data mikrotremor dan GPR dapat dikonversi menjadi parameter geoteknik untuk analisis kestabilan lereng.

Kajian keselamatan dan hukum pertambangan bergerak di jalur yang berbeda. Sultan (2023) menelaah kolaborasi perusahaan, pekerja, dan pemerintah dalam pelaporan kecelakaan dan pengelolaan potensi bahaya di tambang batubara. Susanto et al. (2025) meninjau implementasi Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan (SMKP) dan menemukan belum adanya metode seragam untuk menilai budaya keselamatan, sementara Simorangkir dan Modjo (2026) menguji hubungan tingkat kematangan kinerja keselamatan dengan capaian keselamatan di perusahaan tambang nikel. Dari sisi hukum, Lecia et al. (2025) membahas perlindungan hukum preventif dan represif bagi pekerja tambang yang mengalami kecelakaan kerja, dan Utami (2024) mengkaji pergeseran kewenangan perizinan setelah berlakunya Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020.

Dari dua kelompok kajian tersebut terlihat tiga bentuk **research gap**. Pada sisi teknis, penelitian geofisika umumnya berakhir pada interpretasi kondisi bawah permukaan dan rekomendasi rekayasa, sementara kaitannya dengan kewajiban keselamatan operasional jarang dibahas (Andronikidis et al., 2023; Santosa et al., 2024; Zainal et al., 2021). Pada sisi regulasi, kajian hukum dan manajemen keselamatan membahas kewajiban, pelaporan, dan sanksi, tetapi tidak menguraikan data teknis apa yang seharusnya menjadi dasar identifikasi bahaya geoteknik (Lecia et al., 2025; Sultan, 2023; Susanto et al., 2025). Gap yang ketiga bersifat integratif: masih terbatas kajian yang menyusun rantai hubungan dari metode geofisika, identifikasi geohazard, penilaian risiko, kewajiban keselamatan, mitigasi, sampai kepatuhan regulasi. Bar dan Dixon (2021) serta Perrone (2021) sudah memperlihatkan bahwa data pemantauan dan survei geofisika dapat mendukung manajemen risiko dan keputusan kedaruratan, tetapi keduanya tidak menghubungkan temuan tersebut dengan struktur kewajiban hukum yang mengikat pemegang izin di Indonesia.

Keunikan penelitian (**state of the art**) ini terletak pada pembacaan bersama dua kelompok literatur yang selama ini berjalan terpisah. Kajian ini menempatkan keluaran metode geofisika,

seperti zona resistivitas rendah, penurunan kecepatan gelombang, frekuensi resonansi, anomali GPR, dan laju deformasi, sebagai masukan bagi instrumen hukum yang sudah ada, yaitu manajemen risiko, kajian teknis pertambangan, pemantauan kestabilan lereng, dan SMKP.

Kontribusi penelitian ini berupa matriks dan kerangka integrasi yang menghubungkan indikator geofisika dengan potensi risiko, pengendalian teknis, aspek keselamatan, dasar regulasi, dan implikasi operasional. Kerangka tersebut dapat menjadi bahasa bersama tenaga ahli geofisika, Kepala Teknik Tambang, dan Inspektur Tambang ketika menilai apakah suatu temuan bawah permukaan menuntut tindakan pengendalian.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penerapan metode geofisika dalam identifikasi risiko geohazard pada kegiatan pertambangan?
2. Bagaimana regulasi keselamatan pertambangan di Indonesia mengatur pengelolaan risiko yang berkaitan dengan geohazard?
3. Bagaimana integrasi hasil identifikasi geofisika dengan regulasi keselamatan dapat membentuk kerangka identifikasi dan mitigasi risiko geohazard yang lebih sistematis?

METODE

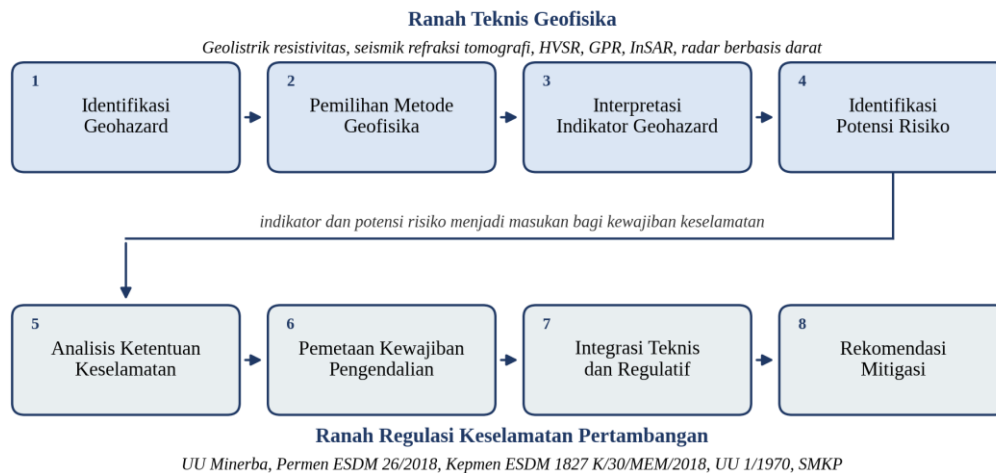
Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif analitis yang memadukan dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah kajian teknis geofisika berbasis literatur yang disusun sebagai *structured literature review*. Pendekatan kedua adalah pendekatan yuridis normatif dengan pendekatan perundang-undangan dan pendekatan konseptual terhadap regulasi keselamatan pertambangan. Penelitian ini tidak melakukan pengukuran lapangan, sehingga seluruh data bersumber dari bahan sekunder.

Bahan teknis berupa artikel jurnal nasional dan internasional yang ditelusuri melalui mesin pencari akademik dan portal penerbit dengan kombinasi kata kunci *geophysics*, *landslide*, *open-pit slope*, *subsidence*, *InSAR*, *electrical resistivity tomography*, *seismic refraction*, *horizontal-to-vertical spectral ratio* (HVSr), GPR, serta padanannya dalam bahasa Indonesia. Artikel dipilih apabila (a) terbit pada jurnal bertelaah sejawat dan memiliki DOI, (b) membahas metode geofisika atau pemantauan deformasi untuk longsor, kestabilan lereng, amblesan, atau rongga, dan (c) terbit dalam rentang 2021 sampai 2026. Dua kajian tinjauan terbitan 2019 dipertahankan karena memuat kerangka konseptual keunggulan dan keterbatasan geofisika untuk longsor yang masih menjadi rujukan. Untuk aspek keselamatan dan hukum, dipilih artikel yang membahas SMKP, pelaporan kecelakaan, perlindungan hukum pekerja tambang, dan kewenangan dalam Undang-Undang Mineral dan Batubara. Hasil seleksi terdiri atas 24 artikel jurnal.

Bahan hukum primer terdiri atas undang-undang, peraturan pemerintah, peraturan menteri, dan keputusan menteri yang berkaitan dengan pertambangan mineral dan batubara, keselamatan kerja, dan penanggulangan bencana. Status setiap peraturan diperiksa pada basis data Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum (JDIH) Badan Pemeriksa Keuangan (BPK) dan JDIH Kementerian ESDM per September 2026 untuk memastikan apakah peraturan tersebut masih berlaku, telah diubah, atau dicabut sebagian. Standar teknis dan pedoman diperlakukan terpisah dari peraturan perundang-undangan karena kekuatan mengikatnya berbeda.

Analisis data teknis dilakukan dengan analisis isi dan sintesis tematik. Setiap artikel dibaca untuk mengenali parameter fisis yang diukur, indikator geohazard yang dihasilkan, jenis geohazard, nilai kegunaan bagi keselamatan, dan keterbatasannya. Analisis bahan hukum memakai penafsiran gramatikal dan sistematis untuk mengidentifikasi kewajiban, subjek yang dibebani kewajiban, dan mekanisme pengawasan. Kedua hasil analisis kemudian dipertemukan melalui pemetaan silang (*crosswalk*) yang mengikuti alur identifikasi geohazard, pemilihan metode geofisika, interpretasi indikator, identifikasi potensi risiko, analisis ketentuan

keselamatan, pemetaan kewajiban pengendalian, integrasi teknis dan regulatif, lalu rekomendasi mitigasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Kerangka penilaian risiko mengacu pada logika manajemen risiko yang menilai kemungkinan dan konsekuensi (International Organization for Standardization, 2018).



Sumber: Hasil Analisis Penelitian

Gambar 1. Kerangka Integrasi Metode Geofisika dan Regulasi Keselamatan dalam Identifikasi Risiko Geohazard

Keabsahan sumber dijaga melalui pemeriksaan DOI, identitas jurnal, dan status berlaku peraturan. Penelitian ini memiliki batasan yang jelas: kerangka yang dihasilkan bersifat konseptual, belum diuji pada satu lokasi tambang, dan tidak memuat ambang nilai parameter geofisika karena ambang tersebut bergantung pada litologi dan kondisi setempat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik dan Klasifikasi Geohazard pada Kegiatan Pertambangan

Geohazard pada kegiatan pertambangan dapat dikelompokkan menurut mekanisme dan lokasi terjadinya. Kelompok pertama adalah ketidakstabilan lereng, yang meliputi longsor bidang, longsor baji, longsor busur, dan jungkiran pada lereng penambangan maupun lereng timbunan (Kolapo et al., 2022). Jatuhan batuan termasuk dalam kelompok ini, tetapi pemicunya biasanya lebih lokal, seperti bidang diskontinuitas yang terbuka akibat getaran peledakan. Kelompok kedua adalah deformasi vertikal berupa amblesan dan runtuh rongga, yang lazim ditemukan di atas lubang bukaan tambang bawah tanah, bekas galian yang tidak tertimbun sempurna, atau batuan karbonat yang berongga (Allam et al., 2025; Zhu et al., 2024). Kelompok ketiga berkaitan dengan air, yaitu zona jenuh air yang menurunkan kuat geser, rembesan pada timbunan, dan kegagalan struktur penampung limbah tambang (Sáez Blázquez et al., 2025).

Setiap kelompok menuntut pertanyaan teknis yang berbeda: letak, kedalaman, dan laju gerak bidang lemah untuk lereng, keberadaan rongga dan luas penurunan muka tanah untuk amblesan, serta sebaran zona jenuh dan perubahannya menurut waktu untuk bahaya hidrogeologi. Pemilihan metode geofisika karena itu sebaiknya berangkat dari jenis geohazard, bukan dari ketersediaan alat.

2. Metode Geofisika untuk Identifikasi Risiko Geohazard

Tomografi resistivitas listrik atau geolistrik resistivitas dua dan tiga dimensi merupakan metode yang paling sering dipakai untuk kajian lereng. Nilai resistivitas turun pada material lempungan dan zona jenuh air, sehingga kontras resistivitas dapat menunjukkan batas antara lapisan lapuk dan batuan dasar yang sering menjadi bidang gelincir. Santosa et al. (2024) menunjukkan bahwa interpretasi tomografi resistivitas yang dikalibrasi dengan data bor dapat menempatkan bidang gelincir pada lapisan lempung setebal 5 sampai 12 m di kedalaman sekitar 24 sampai 26 m, lalu menjadikannya dasar rekomendasi tiang bor dan pemantauan air tanah. Di tambang lignit Mavropigi, Yunani, kombinasi tomografi resistivitas dan seismik refleksi dangkal dipakai untuk menentukan kontak sedimen Neogen dengan batuan dasar sekis serta mengenali sesar yang memengaruhi kestabilan lereng (Andronikidis et al., 2023). Kelemahan utamanya adalah ambiguitas interpretasi, karena resistivitas rendah dapat berasal dari lempung, air, atau mineralisasi, sehingga kalibrasi dengan data langsung tetap diperlukan (Pazzi et al., 2019).

Seismik refraksi tomografi memetakan variasi lateral kecepatan gelombang P. Imani et al. (2021) merangkum bahwa metode ini dapat mengenali material lereng, bidang gelincir, dan pengaruh kejenuhan air, termasuk melalui survei berulang (*time-lapse*). Zainal et al. (2021) memakai lintasan 92 m dengan 24 geofon di Gayo Lues dan membedakan lapisan batusabak, lempung, dan lempung pasir berdasarkan kontras kecepatan. Metode ini peka terhadap tingkat pelapukan dan rekahan, tetapi kurang efektif apabila lapisan berkecepatan rendah berada di bawah lapisan berkecepatan tinggi, kondisi yang dapat dijumpai pada timbunan tambang yang tersusun tidak beraturan.

Metode mikrotremor dengan analisis rasio spektral horizontal terhadap vertikal (HVSr) memanfaatkan getaran alami tanah untuk memperkirakan frekuensi resonansi dan ketebalan lapisan lunak. Alonso-Pandavenes et al. (2023) memadukan HVSr dengan sounding listrik vertikal untuk memetakan permukaan runtutan longsoran yang memotong jalan akses tanpa pengeboran yang mahal. Innocenti et al. (2023) melangkah lebih jauh dengan mengonversi parameter seismik pasif dan data GPR menjadi perkiraan sudut geser dalam untuk analisis kestabilan lereng pada beberapa skenario hujan. Metode ini murah dan mudah diakuisisi, tetapi memerlukan kontras impedansi yang jelas dan mudah terganggu getaran alat berat.

GPR bekerja pada kedalaman dangkal dengan resolusi tinggi dan cocok untuk rongga, rekahan dekat permukaan, serta kondisi lapisan penutup. Allam et al. (2025) menggabungkan GPR, tomografi resistivitas, simulasi numerik, dan verifikasi bor di tambang emas Sukari, Mesir, lalu membagi area menjadi tiga zona risiko amblesan. Sáez Blázquez et al. (2025) memakai GPR berfrekuensi variabel untuk menilai lapisan isolasi fasilitas penimbunan limbah tambang di Yunani, termasuk indikasi akumulasi air. Penetrasi GPR cepat menurun pada material lempungan yang konduktif, sehingga metode ini lebih tepat sebagai pelengkap.

Pemantauan deformasi memberi dimensi waktu yang tidak dimiliki survei geofisika sekali ukur. InSAR satelit memberikan cakupan spasial yang luas untuk pit, timbunan, bendungan, dan infrastruktur, serta memungkinkan analisis balik terhadap kegagalan yang pernah terjadi (Bar & Dixon, 2021). Radar berbasis darat memberi frekuensi pengukuran tinggi pada area yang lebih sempit, dan Ding et al. (2024) memakainya untuk menyusun lima tingkat peringatan berdasarkan percepatan, perubahan kecepatan, dan sudut lereng. Maulana et al. (2023) menunjukkan bahwa radar berbasis darat memiliki keterbatasan dalam membaca perpindahan vertikal, sehingga D-InSAR dipakai untuk melengkapinya, dan hasil pemantauan tersebut dikaitkan dengan penurunan modulus Young massa batuan sebesar 3 sampai 35%. Untuk amblesan tambang batubara, Zhu et al. (2024) menemukan bahwa UAV, D-InSAR, dan SBAS masing-masing paling akurat pada zona penurunan yang berbeda. Casagli et al. (2023) serta Ebrahim et al. (2024) menilai bahwa pilihan teknik pemantauan ditentukan oleh akurasi,

resolusi ruang dan waktu, jangkauan, biaya, dan daya tahan alat di lapangan. Ringkasan metode tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Metode Geofisika dan Jenis Geohazard yang Dapat Diidentifikasi

Metode Geofisika	Parameter yang Diukur	Indikator Geohazard	Jenis Geohazard	Kegunaan untuk Keselamatan	Keterbatasan
Geolistrik resistivitas / tomografi resistivitas listrik	Resistivitas bawah permukaan	Zona resistivitas rendah, kontras lapisan lapuk dan batuan dasar, sesar	Longsor, ketidakstabilan lereng, zona jenuh air	Menentukan letak dan kedalaman bidang gelincir, dasar desain penyaliran	Ambigu antara lempung, air, dan mineralisasi, perlu kalibrasi bor
Seismik refraksi tomografi	Kecepatan gelombang P	Penurunan kecepatan, batas lapisan lapuk, zona rekahan	Longsor, zona rekahan, jatuhnya batuan	Memetakan ketebalan material lemah dan tingkat pelapukan	Kurang efektif pada inversi kecepatan, peka terhadap bising alat berat
Mikrotremor (HVSr)	Frekuensi resonansi dan amplifikasi	Ketebalan lapisan lunak, kontras impedansi	Longsor, deformasi tanah	Survei cepat dan murah untuk memperkirakan kedalaman bidang lemah	Memerlukan kontras impedansi jelas, terganggu getaran operasi
<i>Ground Penetrating Radar</i>	Pantulan gelombang elektromagnetik	Rongga, rekahan dangkal, bidang perlapukan, akumulasi air	Amblesan, runtuhnya rongga, kerusakan lapisan penutup timbunan	Mendeteksi rongga dangkal di bawah jalan angkut dan fasilitas	Penetrasi dangkal, melemah pada material konduktif
InSAR satelit (D-InSAR, SBAS)	Perpindahan muka tanah menurut waktu	Laju dan sebaran deformasi	Amblesan, pergerakan lereng, deformasi timbunan	Cakupan area luas dan analisis balik kegagalan	Resolusi waktu terbatas, kehilangan koherensi pada vegetasi
Radar berbasis darat	Perpindahan dan kecepatan permukaan lereng	Percepatan deformasi, zona aktif	Longsor, jatuhnya batuan	Peringatan dini dan pemantauan hampir waktu nyata	Cakupan sempit, lemah pada komponen vertikal

Sumber: Hasil Analisis Penelitian, disintesis dari Allam et al. (2025), Alonso-Pandavenes et al. (2023), Andronikidis et al. (2023), Bar dan Dixon (2021), Ding et al. (2024), Imani et al. (2021), Maulana et al. (2023), Pazzi et al. (2019), Santosa et al. (2024), dan Zhu et al. (2024).

Tabel 1 memperlihatkan bahwa metode citra bawah permukaan menjawab di mana bidang lemah, air, atau rongga berada, sedangkan metode deformasi menjawab apakah massa tanah atau batuan sedang bergerak dan seberapa cepat. Kombinasi keduanya, seperti pada Allam et al. (2025) dan Maulana et al. (2023), memberi dasar yang lebih dapat dipertanggungjawabkan bagi keputusan keselamatan.

3. Hubungan Indikator Geofisika dengan Risiko Keselamatan Pertambangan

Indikator geofisika baru bernilai bagi keselamatan ketika diterjemahkan ke dalam komponen risiko. Dalam logika manajemen risiko, risiko ditentukan oleh kemungkinan terjadinya peristiwa dan besar konsekuensinya (International Organization for Standardization, 2018). Indikator citra bawah permukaan terutama memengaruhi penilaian kemungkinan. Zona

resistivitas rendah yang menerus sejajar lereng, misalnya, memperbesar kemungkinan terbentuknya bidang gelincir, apalagi bila berimpit dengan penurunan kecepatan gelombang P yang menunjukkan material lapuk atau terkekarkan. Indikator deformasi berperan ganda. Laju pergerakan yang meningkat menaikkan kemungkinan kegagalan dalam waktu dekat, sementara sebaran spasial deformasi memberi gambaran luas area terdampak yang berkaitan dengan konsekuensi.

Konsekuensi sendiri ditentukan oleh apa yang berada di jalur kegagalan: pekerja di lantai tambang, jalan angkut, alat berat, fasilitas pengolahan, permukiman, atau badan air. Karena itu, peta hasil geofisika perlu ditumpangkan pada peta tata letak operasi. Pendekatan ini sejalan dengan pengalaman Perrone (2021), yang menunjukkan bahwa model bawah permukaan dari survei elektromagnetik dan seismik membantu otoritas perlindungan sipil di Basilicata mengambil keputusan kedaruratan setelah hujan ekstrem.

Hubungan ini juga menunjukkan batas kewenangan data geofisika. Indikator geofisika tidak menghasilkan faktor keamanan secara langsung. Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor tetap dihitung melalui analisis geoteknik, tetapi kualitas analisis itu bergantung pada model geologi dan parameter material yang dipakai. Innocenti et al. (2023) memperlihatkan bahwa data geofisika dapat memperbaiki model tersebut. Dengan demikian, kontribusi geofisika bagi keselamatan terletak pada peningkatan mutu masukan analisis kestabilan dan pada deteksi dini perubahan kondisi, bukan pada penggantian analisis geoteknik.

4. Regulasi Keselamatan Pertambangan yang Berkaitan dengan Pengendalian Geohazard

Kerangka normatif pengendalian geohazard pertambangan tersusun berjenjang. Pada tingkat undang-undang, Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara telah diubah beberapa kali, terakhir melalui Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2025 tentang Perubahan Keempat (Republik Indonesia, 2009, 2020, 2023, 2025a). Pasal 96 mewajibkan pemegang izin melaksanakan ketentuan keselamatan pertambangan sebagai bagian dari kaidah teknik pertambangan yang baik, sedangkan Pasal 141 menempatkan keselamatan pertambangan sebagai objek pengawasan. Pada tingkat peraturan pemerintah, Peraturan Pemerintah Nomor 96 Tahun 2021 mengatur pelaksanaan kegiatan usaha pertambangan dan telah diubah melalui Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2024 dan Peraturan Pemerintah Nomor 39 Tahun 2025 (Republik Indonesia, 2021, 2024, 2025b).

Pengaturan yang paling operasional terdapat pada Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2018, yang menurut JDIH BPK masih berlaku. Pasal 3 ayat (3) menyebut aspek kaidah teknik pertambangan yang baik, antara lain teknis pertambangan, keselamatan dan kesehatan kerja pertambangan, serta keselamatan operasi pertambangan. Pasal 14 ayat (4) huruf a menempatkan manajemen risiko sebagai unsur pertama dalam keselamatan dan kesehatan kerja pertambangan, dan Pasal 14 ayat (5) huruf e memasukkan evaluasi laporan hasil kajian teknis pertambangan ke dalam keselamatan operasi. Pasal 18 ayat (1) mewajibkan penerapan SMK3, sedangkan Pasal 45 mengatur pengawasan oleh Inspektur Tambang melalui evaluasi laporan, pemeriksaan, inspeksi, penyelidikan, dan pengujian (Kementerian ESDM, 2018a).

Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 memberi muatan teknis yang lebih dekat dengan geohazard. Lampiran II mendefinisikan geoteknik tambang sebagai pengelolaan teknis yang meliputi penyelidikan, pengujian conto, pengolahan data geoteknik, penerapan rekomendasi geometri dan dimensi bukaan tambang, serta pemantauan kestabilan bukaan tambang. Lampiran yang sama mendefinisikan kajian hidrogeologi dan probabilitas longsor, serta mengatur pemantauan kestabilan lereng yang paling kurang meliputi geometri lereng, pergerakan lereng, metode pemantauan, dan alat pantau. Lampiran I membebaskan kepada Kepala Teknik Tambang kewajiban melaksanakan manajemen risiko pada setiap proses bisnis dan subproses kegiatan pertambangan (Kementerian ESDM, 2018b). Keputusan ini

tercatat dicabut sebagian oleh Keputusan Menteri ESDM Nomor 111.K/MB.01/MEM.B/2024, tetapi pencabutan itu hanya menyangkut ketentuan pembukaan kembali area yang telah direklamasi (Kementerian ESDM, 2024), sehingga ketentuan geoteknik dan keselamatan yang dibahas di sini masih berlaku.

Di luar rezim pertambangan, Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 memasukkan tempat usaha pertambangan ke dalam ruang lingkup tempat kerja dan mewajibkan syarat keselamatan untuk mencegah dan mengurangi kecelakaan (Republik Indonesia, 1970). Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 mengatur penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) secara umum (Republik Indonesia, 2012). Apabila kegagalan lereng atau amblesan berdampak ke luar wilayah izin, Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana relevan melalui konsep mitigasi sebagai upaya mengurangi risiko bencana (Republik Indonesia, 2007). Kedudukan masing-masing sumber disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kedudukan Sumber Normatif dan Rujukan dalam Pengendalian Geohazard Pertambangan

Kategori	Sumber	Status (per September 2026)	Relevansi terhadap Geohazard
Peraturan yang berlaku	UU No. 4 Tahun 2009 jo. UU No. 3 Tahun 2020, UU No. 6 Tahun 2023, dan UU No. 2 Tahun 2025	Berlaku dengan perubahan	Kewajiban kaidah teknik pertambangan yang baik dan keselamatan pertambangan (Pasal 96), pengawasan (Pasal 141)
Peraturan yang berlaku	PP No. 96 Tahun 2021 jo. PP No. 25 Tahun 2024 dan PP No. 39 Tahun 2025	Berlaku dengan perubahan	Pelaksanaan kegiatan usaha pertambangan
Peraturan yang berlaku	Permen ESDM No. 26 Tahun 2018	Berlaku	Manajemen risiko, kajian teknis, keselamatan operasi, SMK3, pengawasan
Peraturan yang berlaku	UU No. 1 Tahun 1970, PP No. 50 Tahun 2012, UU No. 24 Tahun 2007	Berlaku	Syarat keselamatan kerja, SMK3, mitigasi bencana
Pedoman	Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018	Berlaku, dicabut sebagian oleh Kepmen ESDM No. 111.K/MB.01/MEM.B/2024 khusus pembukaan kembali area reklamasi	Geoteknik tambang, kajian hidrogeologi, probabilitas longsor, pemantauan kestabilan lereng
Regulasi historis	Permen ESDM No. 38 Tahun 2014 tentang SMK3 dan Kepmen No. 555.K/26/M.PE/1995	Dicabut oleh Permen ESDM No. 26 Tahun 2018	Tidak dipakai sebagai hukum positif
Standar teknis	SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017) dan ISO 31000:2018	Tidak mengikat kecuali dirujuk peraturan	Rujukan perancangan geoteknik dan kerangka manajemen risiko
Literatur akademik	24 artikel jurnal nasional dan internasional	Bahan sekunder	Dasar analisis metode, indikator, dan kesenjangan

Sumber: Hasil Analisis Penelitian berdasarkan JDIH BPK dan JDIH Kementerian ESDM.

Tabel 2 menunjukkan bahwa kewajiban untuk mengenali dan mengendalikan bahaya geoteknik sudah ada dalam hukum positif. Yang belum ada adalah ketentuan tentang jenis data

yang sebaiknya dipakai untuk memenuhi kewajiban tersebut. Istilah seperti penyelidikan geoteknik, kajian hidrogeologi, dan pemantauan pergerakan lereng bersifat terbuka terhadap pilihan metode. Keterbukaan ini memberi ruang bagi geofisika, tetapi membuat penggunaannya bergantung pada kebijakan masing-masing perusahaan.

5. Kesenjangan antara Kebutuhan Identifikasi Teknis dan Implementasi Kewajiban Keselamatan

Perbandingan hasil kajian teknis dan normatif memperlihatkan empat kesenjangan, dan yang pertama bersifat terminologis. Regulasi memakai istilah geoteknik, hidrogeologi, dan pergerakan lereng, sementara laporan geofisika memakai istilah resistivitas semu, model kecepatan, dan kurva HVSR. Tanpa penerjemahan, Inspektur Tambang maupun manajemen perusahaan sulit menilai apakah suatu laporan geofisika sudah menjawab kewajiban kajian teknis.

Kesenjangan kedua menyangkut waktu. Survei geofisika untuk desain tambang biasanya dilakukan sekali pada tahap studi kelayakan, sedangkan kondisi lereng berubah setiap kali penambangan maju, musim hujan datang, atau muka air tanah bergeser. Whiteley et al. (2019) menjelaskan bahwa pemantauan kadar air dengan geofisika berulang dapat menangkap kondisi pemicu longsor sebelum pergerakan terlihat. Regulasi mewajibkan pemantauan kestabilan lereng, tetapi tidak menentukan kapan kajian bawah permukaan perlu diperbarui.

Kesenjangan ketiga berkaitan dengan ambang tindakan. Ding et al. (2024) memperlihatkan bahwa data radar dapat diterjemahkan menjadi lima tingkat peringatan, tetapi ambang tersebut dikembangkan untuk kondisi di Tiongkok timur laut dan belum tentu cocok untuk lereng lempung di tambang batubara Sumatra atau Kalimantan. Pedoman nasional sudah mengenal faktor keamanan dan probabilitas longsor sebagai ukuran kestabilan lereng, namun belum ada padanan untuk indikator geofisika dan laju deformasi yang dapat memicu tindakan pengendalian.

Kesenjangan keempat bersifat kelembagaan. Kajian keselamatan menunjukkan bahwa efektivitas teknologi keselamatan bergantung pada kesiapan organisasi, komitmen pimpinan, dan keterlibatan pekerja (Haryandi et al., 2026), sedangkan kajian SMKP menemukan belum seragamnya metode penilaian budaya keselamatan (Susanto et al., 2025). Data geofisika yang baik tidak akan berguna apabila tidak ada prosedur yang menetapkan siapa yang membaca data, siapa yang memutuskan, dan dalam berapa lama keputusan harus diambil. Pembahasan hukum yang cenderung berfokus pada tanggung jawab setelah kecelakaan (Lecia et al., 2025) juga menunjukkan bahwa sisi preventif berbasis data teknis masih kurang mendapat perhatian.

6. Model Integrasi Metode Geofisika dengan Regulasi Keselamatan

Model integrasi yang diusulkan mengikuti alur pada Gambar 1 dan diwujudkan dalam matriks pada Tabel 3. Matriks ini membaca setiap geohazard dari dua arah sekaligus. Dari arah teknis, matriks menunjukkan indikator geofisika yang relevan dan potensi risikonya. Dari arah hukum, matriks menunjukkan aspek keselamatan dan dasar regulasi yang mewajibkan pengendalian. Kolom terakhir menerjemahkan keduanya menjadi implikasi operasional yang dapat dilaksanakan oleh Kepala Teknik Tambang dan diperiksa oleh Inspektur Tambang.

Tabel 3. Matriks Integrasi Indikator Geohazard dengan Kebutuhan Pengendalian Keselamatan dan Regulasi

Geohazard	Indikator Geofisika	Potensi Risiko	Pengendalian Teknis	Aspek Keselamatan	Dasar Regulasi	Implikasi Operasional
Longsor lereng	Zona resistivitas rendah sejajar lereng,	Kegagalan lereng yang menimpa	Penyesuaian geometri lereng,	Keselamatan operasi,	Permen ESDM 26/2018 Pasal 14, Kepmen	Pembaruan kajian geoteknik

Geohazard	Indikator Geofisika	Potensi Risiko	Pengendalian Teknis	Aspek Keselamatan	Dasar Regulasi	Implikasi Operasional
penambang an	penurunan kecepatan gelombang P	pekerja dan alat	penyaliran, analisis balik kestabilan	manajemen risiko	1827/2018 Lampiran II	dan zona larangan masuk
Jatuh an batuan	Zona rekahan dari seismik refraksi, percepatan deformasi dari radar	Cedera pekerja di kaki lereng dan jalan angkut	Penyaringan batuan lepas, tanggul penahan, jaring	K3 pertambangan	Permen ESDM 26/2018 Pasal 14 ayat (4), UU 1/1970 Pasal 3	Inspeksi sebelum pergantian gilir dan pembatasan akses
Amblesan dan runtuh an rongga	Anomali GPR, zona resistivitas tinggi atau rendah setempat, laju penurunan dari InSAR	Runtuhnya jalan angkut atau fasilitas	Pengisian rongga, relokasi fasilitas, pemantauan penurunan	Keselamatan operasi	Kepmen 1827/2018 Lampiran II, Permen ESDM 26/2018 Pasal 14 ayat (5)	Pemetaan zona risiko dan pembatasan beban
Deformasi timbunan	Perubahan resistivitas berulang, deformasi dari InSAR atau radar	Longsor timbunan yang melampaui batas izin	Penataan ulang timbunan, penyaliran bawah permukaan	Keselamatan operasi, lingkungan	Permen ESDM 26/2018 Pasal 3 ayat (3)	Pemantauan berkala pada musim hujan
Bahaya hidrogeologi	Zona jenuh air dari geolistrik, anomali GPR pada lapisan penutup	Penurunan kuat geser, rembesan, kegagalan fasilitas limbah	Sumur penyaliran, piezometer, perbaikan lapisan isolasi	Keselamatan operasi, manajemen risiko	Kepmen 1827/2018 Lampiran II (kajian hidrogeologi)	Integrasi data air tanah ke daftar bahaya SMK P

Sumber: Hasil Analisis Penelitian.

Matriks tersebut tidak menciptakan kewajiban baru karena seluruh kewajiban yang dirujuk sudah ada dalam kedua instrumen menteri tersebut. Nilai tambahanya terletak pada penempatan data geofisika sebagai bukti teknis yang dapat dipakai untuk memenuhi dan menilai kepatuhan terhadap kewajiban tersebut.

7. Strategi Pemanfaatan Hasil Geofisika dalam Proses Manajemen Risiko

Pemanfaatan hasil geofisika dalam manajemen risiko dapat dijalankan melalui beberapa langkah. Pada tahap identifikasi bahaya, hasil survei bawah permukaan dipakai untuk memperbarui daftar bahaya geoteknik per blok penambangan. Pada tahap analisis risiko, indikator geofisika diberi bobot pada komponen kemungkinan, sedangkan tata letak pekerja dan fasilitas menentukan komponen konsekuensi. Pada tahap evaluasi, hasilnya dipakai untuk memperbaiki analisis faktor keamanan dan probabilitas longsor sebagaimana dikenal dalam pedoman teknis. Pada tahap pengendalian, pilihan tindakan disusun mulai dari rekayasa, seperti perubahan geometri lereng, penyaliran, dan penguatan, sampai tindakan administratif seperti pembatasan akses dan penyesuaian jadwal kerja.

Strategi berikutnya adalah menyusun ambang tindakan berbasis data lokal. Perusahaan dapat memakai data pemantauan beberapa musim, seperti yang dilakukan Bar dan Dixon (2021) melalui analisis balik kegagalan, untuk menetapkan ambang laju deformasi dan perubahan resistivitas yang memicu inspeksi tambahan atau penghentian sementara. Ambang

semacam ini perlu disahkan di dalam prosedur SMKP agar mengikat secara internal dan dapat diperiksa oleh pengawas. Setiap survei juga perlu didokumentasikan bersama parameter akuisisi, keterbatasan interpretasi, dan data kalibrasinya agar keputusan keselamatan dapat ditelusuri ketika terjadi penyelidikan kecelakaan.

8. Implikasi Integrasi bagi Para Pemangku Kepentingan

Bagi perusahaan pertambangan, integrasi ini berarti anggaran survei geofisika tidak lagi diperlakukan sebagai biaya eksplorasi semata, tetapi sebagai bagian dari biaya pengendalian risiko keselamatan. Kepala Teknik Tambang memperoleh dasar yang lebih kuat untuk menjalankan kewajiban manajemen risiko karena keputusan pengendalian dapat didukung oleh data bawah permukaan yang terukur. Tenaga ahli geofisika perlu melengkapi laporannya dengan tingkat keyakinan interpretasi dan implikasi keselamatan.

Bagi pengawas keselamatan dan Inspektur Tambang, matriks pada Tabel 3 dapat dipakai sebagai daftar periksa saat mengevaluasi laporan kajian teknis dan hasil pemantauan lereng. Bagi regulator, temuan ini menunjukkan perlunya pedoman teknis yang lebih rinci tentang peran geofisika dalam kajian geoteknik dan hidrogeologi. Pedoman tersebut dapat disusun tanpa mengubah undang-undang, karena Pasal 15 Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2018 telah memberi dasar bagi menteri untuk menetapkan pedoman pelaksanaan keselamatan pertambangan (Kementerian ESDM, 2018a). Temuan Simorangkir dan Modjo (2026) bahwa tingkat kematangan kinerja keselamatan berkaitan dengan capaian keselamatan yang lebih baik membuka peluang untuk memasukkan pemanfaatan data geoteknik sebagai salah satu unsur penilaian.

Temuan Penelitian (*Novelty*)

Temuan utama penelitian ini adalah bahwa hambatan pemanfaatan geofisika bagi keselamatan pertambangan di Indonesia tidak terletak pada kurangnya dasar hukum, karena kewajiban manajemen risiko, kajian teknis, pemantauan lereng, dan SMKP sudah tersedia. Hambatannya terletak pada tidak adanya jembatan operasional antara bahasa teknis geofisika dan bahasa kewajiban hukum. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui kerangka integrasi delapan tahap dan matriks yang menghubungkan jenis geohazard, indikator geofisika, potensi risiko, pengendalian teknis, aspek keselamatan, dasar regulasi, dan implikasi operasional. Kebaruan ini bersifat sintesis dan konseptual, sehingga penerapannya masih memerlukan pengujian pada lokasi tambang tertentu.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan tiga hal sesuai rumusan masalah. Terkait rumusan pertama, metode geofisika berperan dalam identifikasi risiko geohazard pertambangan melalui dua fungsi yang saling melengkapi, yaitu pencitraan bawah permukaan dengan geolistrik resistivitas, seismik refraksi tomografi, HVSAR, dan GPR untuk menemukan bidang lemah, zona jenuh air, dan rongga, serta pemantauan deformasi dengan InSAR dan radar berbasis darat untuk mengetahui apakah massa batuan sedang bergerak. Pemilihan metode perlu mengikuti jenis geohazard dan tetap memerlukan kalibrasi dengan data langsung.

Terkait rumusan kedua, regulasi keselamatan pertambangan Indonesia yang berlaku sudah mengatur pengelolaan risiko geohazard secara tidak langsung melalui kewajiban kaidah teknik pertambangan yang baik, manajemen risiko, evaluasi kajian teknis, pemantauan kestabilan lereng, SMKP, dan pengawasan Inspektur Tambang. Pengaturan tersebut bersifat terbuka terhadap pilihan metode dan belum menetapkan kedudukan data geofisika maupun ambang tindakannya.

Terkait rumusan ketiga, integrasi dapat dibangun dengan menempatkan indikator geofisika sebagai masukan pada tahap identifikasi dan analisis risiko, lalu menghubungkannya dengan kewajiban pengendalian dan dasar regulasi melalui matriks integrasi. Kerangka ini membuat hasil survei dapat ditelusuri sampai ke keputusan keselamatan dan pemeriksaan kepatuhan.

Keterbatasan

Kajian ini sepenuhnya bertumpu pada data sekunder berupa artikel jurnal dan dokumen peraturan, sehingga kerangka integrasi yang dihasilkan belum diuji pada satu lokasi tambang. Sebagian besar studi geofisika yang dianalisis berasal dari lereng jalan, longsoran alami, atau tambang di luar Indonesia, sehingga kesesuaian kondisinya dengan tambang di Indonesia masih perlu dibuktikan. Kajian ini juga tidak menetapkan ambang nilai parameter geofisika karena nilai tersebut sangat bergantung pada litologi setempat. Status peraturan diperiksa per September 2026, sehingga perubahan peraturan setelah tanggal tersebut belum terakomodasi.

Saran

Perusahaan pertambangan disarankan memasukkan survei geofisika berkala dan pemantauan deformasi ke dalam program kerja geoteknik, lalu mengaitkan hasilnya dengan daftar bahaya dan prosedur SMK. Tenaga ahli geofisika perlu menyertakan tingkat keyakinan interpretasi dan implikasi keselamatan dalam setiap laporan, sedangkan tenaga keselamatan pertambangan perlu dilibatkan sejak perencanaan survei.

Regulator dapat mempertimbangkan penyusunan pedoman teknis tentang peran data geofisika dalam kajian geoteknik dan hidrogeologi, termasuk kewajiban pembaruan kajian ketika kondisi tambang berubah. Peneliti berikutnya disarankan menguji matriks integrasi ini pada tambang batubara atau nikel di Indonesia dengan data lapangan, menyusun ambang tindakan berbasis data lokal, dan menilai pengaruh penerapannya terhadap kinerja keselamatan.

Kontribusi Author

Putri Mulyani berkontribusi pada konseptualisasi aspek geofisika, kajian metode geofisika, pengumpulan dan analisis literatur teknis, analisis teknis, serta penyusunan naskah. Lidya Agustin berkontribusi pada analisis regulasi, penyusunan kerangka hukum keselamatan, interpretasi aspek hukum, integrasi aspek teknis dan regulasi, serta telaah dan penyempurnaan manuskrip. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

REFERENSI

- Allam, H., Metwally, A., Ismael, M., Chilala, G., Elkarmoty, M., & Kamel, M. H. (2025). Subsurface voids detection using GPR and ERT techniques: A case study in Sukari gold mine, Egypt. *Pure and Applied Geophysics*, 182(10), 4137–4167. <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03805-z>
- Alonso-Pandavenes, O., Torrijo, F. J., Garzón-Roca, J., & Gracia, A. (2023). Early investigation of a landslide sliding surface by HVSR and VES geophysical techniques combined, a case study in Guarumales (Ecuador). *Applied Sciences*, 13(2), 1023. <https://doi.org/10.3390/app13021023>
- Andronikidis, N., Kritikakis, G., Vafidis, A., Hamdan, H., Agioutantis, Z., Steiakakis, C., & Economou, N. (2023). Geophysical research on an open pit mine for geotechnical planning and future land reclamation: A case study from NW Macedonia, Greece. *Sustainability*, 15(19), 14476. <https://doi.org/10.3390/su151914476>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional.

- Bar, N., & Dixon, R. (2021). Unveiling unknowns: Practical application of InSAR for slope performance monitoring and risk management across multiple surface mines. *Engineering Geology*, 293, 106326. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106326>
- Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., Gigli, G., & Raspini, F. (2023). Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 51–64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>
- Ding, H., Li, Q., Zhao, L., Qi, L., Tang, S., Zhang, M., Li, M., & He, S. (2024). Model and criteria for slope monitoring and early warning in open-pit mines using ground-based real aperture radar. *Environmental Earth Sciences*, 83, 556. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11863-0>
- Ebrahim, K. M. P., Gomaa, S. M. M. H., Zayed, T., & Alfalah, G. (2024). Recent phenomenal and investigational subsurface landslide monitoring techniques: A mixed review. *Remote Sensing*, 16(2), 385. <https://doi.org/10.3390/rs16020385>
- Haryandi, Sudiarno, A., & Al Khindi, B. (2026). Technology-enabled transformation of mining safety culture in Indonesia: A multi-case study toward Safety 5.0 readiness. *Procedia Computer Science*, 284, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2026.07.024>
- Imani, P., Abd El-Raouf, A., & Tian, G. (2021). Landslide investigation using seismic refraction tomography method: A review. *Annals of Geophysics*, 64(6), SE657. <https://doi.org/10.4401/ag-8633>
- Innocenti, A., Rosi, A., Tofani, V., Pazzi, V., Gargini, E., Masi, E. B., Segoni, S., Bertolo, D., Paganone, M., & Casagli, N. (2023). Geophysical surveys for geotechnical model reconstruction and slope stability modelling. *Remote Sensing*, 15(8), 2159. <https://doi.org/10.3390/rs15082159>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management: Guidelines*. ISO.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018a). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2018 tentang Pelaksanaan Kaidah Pertambangan yang Baik dan Pengawasan Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018b). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 111.K/MB.01/MEM.B/2024 tentang Pedoman Permohonan, Evaluasi, dan Persetujuan Pembukaan Kembali Area yang Telah Direklamasi pada Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Kolapo, P., Oniyide, G. O., Said, K. O., Lawal, A. I., Onifade, M., & Munemo, P. (2022). An overview of slope failure in mining operations. *Mining*, 2(2), 350–384. <https://doi.org/10.3390/mining2020019>
- Lecia, N., Wijayati, A., & Widiarty, W. S. (2025). Perlindungan hukum bagi pekerja yang mengalami kecelakaan kerja di sektor pertambangan. *Jurnal Sosial Teknologi*, 5(9), 3788–3801. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v5i9.32384>
- Maulana, F. R., Wattimena, R. K., & Sulistianto, B. (2023). Integrated D-InSAR and ground-based radar for open pit slope stability monitoring and implications for rock mass Young's modulus reduction. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 55(3), 247–260. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2023.55.3.3>
- Pazzi, V., Morelli, S., & Fanti, R. (2019). A review of the advantages and limitations of geophysical investigations in landslide studies. *International Journal of Geophysics*, 2019, 2983087. <https://doi.org/10.1155/2019/2983087>

- Perrone, A. (2021). Lessons learned by 10 years of geophysical measurements with Civil Protection in Basilicata (Italy) landslide areas. *Landslides*, 18(4), 1499–1508. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01584-3>
- Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*.
- Republik Indonesia. (2007). *Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana*.
- Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*.
- Republik Indonesia. (2020). *Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 96 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Republik Indonesia. (2023). *Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang*.
- Republik Indonesia. (2024). *Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2024 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah Nomor 96 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Republik Indonesia. (2025a). *Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2025 tentang Perubahan Keempat atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Republik Indonesia. (2025b). *Peraturan Pemerintah Nomor 39 Tahun 2025 tentang Perubahan Kedua atas Peraturan Pemerintah Nomor 96 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara*.
- Sáez Blázquez, C., Maté-González, M. Á., Camargo Vargas, S. A., Martín Nieto, I., Protonotarios, V., & González-Aguilera, D. (2025). Ground penetrating radar for the exploration of complex mining contexts. *Remote Sensing*, 17(11), 1911. <https://doi.org/10.3390/rs17111911>
- Santosa, I., Sulaksana, N., Yuningsih, E. T., & Zakaria, Z. (2024). The sliding surface determination of a deep-seated landslide on Cisumdawu Highway, West Java, based on the electrical resistivity tomography. *Indonesian Journal on Geoscience*, 11(2), 189–199. <https://doi.org/10.17014/ijog.11.2.189-199>
- Simorangkir, D. A., & Modjo, R. (2026). Safety and health maturity levels as indicators of accident reduction in Indonesia's nickel mining sector. *F1000Research*, 15, 13. <https://doi.org/10.12688/f1000research.175381.1>
- Sultan, M. (2023). Collaboration tripartite elements accident reporting and potential hazards management coal mining, Indonesia: Systematic review. *Journal of Health Science and Medical Research*, 41(6), e2023961. <https://doi.org/10.31584/jhsmr.2023961>
- Susanto, A., Hania, S., Wijoyo, N. J., Kurniawan, W., Wiyarta, W., Budi, S. C., Pane, Y., & Prasetyo, D. B. (2025). Implementasi sistem manajemen keselamatan pertambangan di sektor minerba Indonesia: Tinjauan literatur sistematis. *Jurnal Kesehatan*, 18(1), 1–10. <https://doi.org/10.32763/yzppp082>
- Utami, N. E. (2024). Sentralisasi terhadap kewenangan pemerintah daerah dalam perizinan tambang pasca pemberlakuan Undang-Undang Mineral dan Batubara. *Lex Renaissance*, 8(2), 360–378. <https://doi.org/10.20885/JLR.vol8.iss2.art10>

- Whiteley, J. S., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., & Kendall, J. M. (2019). Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57(1), 106–145. <https://doi.org/10.1029/2018RG000603>
- Zainal, M., Munir, B., Marwan, M., Yanis, M., & Muhni, A. (2021). Characterization of landslide geometry using seismic refraction tomography in the Gayo Lues, Indonesia. *Journal of Physics and Its Applications*, 3(2), 148–154. <https://doi.org/10.14710/jpa.v3i2.10601>
- Zhu, M., Yu, X., Tan, H., & Yuan, J. (2024). Integrated high-precision monitoring method for surface subsidence in mining areas using D-InSAR, SBAS, and UAV technologies. *Scientific Reports*, 14, 12445. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63400-5>