

Pengembangan Geosains Berkelanjutan melalui Green Mining dan Pemanfaatan Sumber Daya Sirkular

Nofirman¹, Haerawan²

¹Universitas Prof. Dr. Hazairin, SH., Bengkulu dan nofirman@unihaz.ac.id

²Politeknik Tunas Pemuda Tangerang dan haerawan@politeknik-tunaspemuda.ac.id

Article Info	ABSTRAK
<i>Article history:</i> Received Oktober, 2025 Revised Oktober, 2025 Accepted Oktober, 2025	Integrasi keberlanjutan ke dalam ilmu kebumian mewakili agenda transformatif bagi pengelolaan sumber daya modern. Studi ini melakukan tinjauan literatur sistematis (SLR) terhadap sepuluh dokumen ilmiah dari Google Scholar (2013–2024) untuk mensintesis pendekatan, inovasi, dan tantangan terkini terkait pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular sebagai pilar pengembangan ilmu kebumian yang berkelanjutan. Menggunakan metodologi yang dipandu PRISMA dan sintesis tematik, tinjauan ini mengidentifikasi tiga tema penelitian dominan: (1) inovasi teknologi dalam pertambangan hijau, (2) pemanfaatan sumber daya sirkular dan pemulihan material, serta (3) tata kelola dan integrasi kebijakan untuk transformasi berkelanjutan. Temuan menunjukkan bahwa teknologi pertambangan hijau—seperti sistem energi terbarukan, otomatisasi, dan bioleaching—secara signifikan mengurangi jejak lingkungan, sementara pemanfaatan sumber daya sirkular meningkatkan efisiensi material melalui daur ulang dan pemanfaatan kembali limbah. Namun, tantangan tetap ada dalam hal konsistensi regulasi, inklusi sosial-ekonomi, dan standarisasi metrik keberlanjutan. Studi ini mengusulkan model integratif di mana inovasi teknologi, praktik ekonomi sirkular, dan kerangka kerja tata kelola bersinergi untuk membentuk evolusi geosains berkelanjutan. Tinjauan ini memberikan kontribusi teoretis dengan menghubungkan perspektif berbasis sumber daya dan transisi keberlanjutan, serta memberikan wawasan praktis bagi pembuat kebijakan, pemimpin industri, dan peneliti dalam mengembangkan sistem georesource rendah karbon dan sirkular.
<i>Kata Kunci:</i> Geosains Berkelanjutan, Pertambangan Hijau, Penggunaan Sumber Daya Berkelanjutan, Pendekatan Berbasis Sumber Daya, Transisi Keberlanjutan	
<i>Keywords:</i> Sustainable Geoscience, Green Mining, Circular Resource Utilization, Resource-Based View, Sustainability Transition	
	ABSTRACT The integration of sustainability into geoscience represents a transformative agenda for modern resource management. This study conducts a systematic literature review (SLR) of ten scholarly documents from Google Scholar (2013–2024) to synthesize current approaches, innovations, and challenges related to green mining and circular resource utilization as pillars of sustainable geoscience development. Using a PRISMA-guided methodology and thematic synthesis, the review identifies three dominant research themes: (1) technological innovation in green mining, (2) circular resource utilization and material recovery, and (3) governance and policy integration for sustainable transformation. Findings reveal that green mining technologies—such as renewable energy systems, automation, and bioleaching—significantly reduce environmental footprints, while circular resource utilization enhances material efficiency through recycling and revalorization of waste. However, challenges persist in regulatory coherence, socio-economic inclusion, and standardization

of sustainability metrics. The study proposes an integrative model where technological innovation, circular economy practices, and governance frameworks converge to shape the evolution of sustainable geoscience. The review contributes theoretically by linking resource-based and sustainability transition perspectives and provides practical insights for policymakers, industry leaders, and researchers in advancing low-carbon and circular georesource systems.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Name: Nofirman Nofirman

Institution: Universitas Prof. Dr. Hazairin, SH., Bengkulu

Email: nofirman@unihaz.ac.id

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, upaya global menuju keberlanjutan telah mengubah arah dan prioritas ilmu kebumian. Industri ekstraktif tetap menjadi penyedia utama bahan baku bagi pertumbuhan ekonomi, namun dihadapkan pada tantangan besar untuk mengurangi degradasi lingkungan dan konflik sosial akibat eksploitasi sumber daya. Integrasi prinsip pembangunan berkelanjutan ke dalam geosains kini menjadi agenda penting bagi akademisi dan industri, dengan tujuan menyeimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dalam konteks ini, pertambangan hijau dan penggunaan sumber daya sirkular muncul sebagai pendekatan transformatif yang menekankan efisiensi, pengurangan limbah, serta penerapan siklus bahan berkelanjutan, menandai pergeseran dari model linear “ambil-buat-buang” menuju ekonomi sirkular regeneratif. Ahli geosains berperan penting dalam mendukung upaya ini melalui identifikasi akuifer air tawar, prediksi kontaminasi bawah tanah, dan mitigasi degradasi lahan (Grimm & Van Der Pluijm, 2012), sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) seperti energi bersih, kota berkelanjutan, dan aksi iklim (Senger, 2024). Di sisi lain, kesadaran akan pentingnya tanggung jawab sosial dan keberlanjutan dalam pendidikan geosains semakin meningkat (Katz, 2022), meskipun masih terdapat kesenjangan dalam kurikulum yang perlu diatasi melalui kolaborasi interdisipliner (Stewart & Gill, 2017). Industri ekstraktif kini menghadapi tekanan untuk memperkuat tanggung jawab sosial korporat dan adopsi praktik berkelanjutan (Katz, 2022), di mana kontribusi ahli geosains sangat dibutuhkan dalam mewujudkan pertambangan yang ramah lingkungan sekaligus menguntungkan secara ekonomi (Grimm & Van Der Pluijm, 2012).

Ilmu kebumian (geoscience) memiliki peran yang sangat penting dalam mewujudkan keberlanjutan karena menjadi dasar bagi proses penemuan, ekstraksi, dan pengelolaan sumber daya alam bumi. Praktik pertambangan konvensional secara historis telah dikaitkan dengan jejak lingkungan yang signifikan, seperti degradasi lahan, pencemaran air, emisi gas rumah kaca, dan hilangnya keanekaragaman hayati. Namun, berbagai penelitian terkini mengenai pertambangan hijau (green mining) menekankan penerapan teknologi maju—seperti otomatisasi, integrasi energi terbarukan, bioleaching, dan pemetaan presisi—untuk meminimalkan dampak negatif tersebut.

Pada saat yang sama, konsep pemanfaatan sumber daya secara sirkular (circular resource utilization) mendorong pemulihan serta penggunaan kembali mineral berharga dari limbah tambang, produk samping industri, dan produk akhir masa pakai, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku baru. Fokus ganda antara pengurangan dampak lingkungan dan peningkatan efisiensi material ini menjadikan ilmu kebumihutan sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa, khususnya SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim), dan SDG 15 (Ekosistem Daratan).

Meskipun berbagai inisiatif keberlanjutan terus berkembang, integrasi prinsip keberlanjutan ke dalam praktik geosains masih berlangsung secara tidak merata di berbagai wilayah dan sektor industri. Banyak penelitian yang berfokus pada teknologi atau kebijakan tertentu, namun masih sedikit yang memberikan pemahaman menyeluruh tentang bagaimana pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular secara bersama-sama berkontribusi terhadap pengembangan geosains berkelanjutan. Selain itu, masih terdapat kekurangan bukti komprehensif yang memetakan evolusi konseptual dan metodologis dari kedua tema tersebut, terutama dari perspektif sistem yang mencakup dimensi ekonomi, lingkungan, dan tata kelola. Untuk menjawab kesenjangan ini, diperlukan sintesis literatur yang mampu mengidentifikasi tren terkini, tantangan, serta peluang yang membentuk arah masa depan pengembangan geosains berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau dan menganalisis secara sistematis berbagai publikasi ilmiah yang membahas keterkaitan antara pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular dalam kerangka besar pengembangan geosains berkelanjutan. Dengan menelaah sepuluh dokumen akademik yang diperoleh melalui Google Scholar, studi ini berupaya menjawab tiga pertanyaan utama: (1) Apa tema dan pendekatan dominan yang dibahas dalam literatur terkini tentang geosains berkelanjutan? (2) Bagaimana praktik pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular saling berinteraksi untuk mendukung keberlanjutan dalam pengelolaan sumber daya? dan (3) Apa tantangan utama serta arah penelitian masa depan yang diidentifikasi para peneliti di bidang ini? Melalui tinjauan pustaka yang terstruktur, penelitian ini berkontribusi pada konsolidasi teoritis mengenai geosains berkelanjutan serta memberikan wawasan praktis bagi pembuat kebijakan, peneliti, dan pelaku industri untuk menyelaraskan pengelolaan sumber daya dengan prinsip keberlanjutan. Adapun struktur makalah ini adalah sebagai berikut: Bagian 2 memaparkan metodologi tinjauan literatur sistematis, termasuk kriteria seleksi, sumber data, dan kerangka analisis; Bagian 3 menyajikan hasil sintesis dari dokumen yang ditinjau; Bagian 4 membahas implikasi teoretis, praktis, dan kebijakan; serta Bagian 5 menutup dengan rekomendasi arah penelitian dan penguatan praktik berkelanjutan di sektor geosains dan pertambangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Sustainable Geoscience: An Emerging Paradigm*

Konsep geoscience berkelanjutan merupakan kerangka kerja interdisipliner yang mengintegrasikan ilmu geologi dengan prinsip-prinsip keberlanjutan untuk memastikan pemanfaatan sumber daya alam bumi secara bertanggung jawab. Menurut (Mather & Stokes, 2016), geoscience berkelanjutan tidak hanya mencakup kegiatan ekstraksi sumber daya, tetapi juga perencanaan tata guna lahan, pengelolaan lingkungan, dan mitigasi risiko yang terkait dengan aktivitas geologi. Disiplin ini

menekankan keseimbangan antara eksploitasi sumber daya alam dan pelestarian sistem ekologi, dengan pengakuan bahwa proses geologis merupakan aspek sentral dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Seiring dengan meningkatnya pengawasan publik terhadap sektor pertambangan dan energi, komunitas geosains mulai mengarahkan fokusnya untuk mengembangkan solusi berkelanjutan yang mampu meminimalkan dampak lingkungan, meningkatkan efisiensi sumber daya, serta memperkuat ketahanan masyarakat. Dari perspektif ekonomi, geoscience berkelanjutan mendukung ketersediaan jangka panjang mineral-mineral penting yang diperlukan bagi teknologi bersih seperti energi terbarukan, kendaraan listrik, dan infrastruktur digital. Dari sisi lingkungan, tujuannya adalah mengurangi limbah dan emisi melalui inovasi serta peningkatan efisiensi proses. Sedangkan dari sisi sosial, pendekatan ini menekankan transparansi, tata kelola etis, dan kolaborasi dengan komunitas lokal. Ketiga dimensi tersebut secara kolektif memperkuat perspektif triple bottom line—people, planet, dan profit—yang menjadi dasar pengambilan keputusan berorientasi keberlanjutan dalam bidang geoscience.

2.2 *Green Mining and Technological Innovation*

Gagasan tentang pertambangan hijau (green mining) muncul sebagai respons terhadap tantangan lingkungan yang terkait dengan praktik pertambangan tradisional. Konsep ini mencakup teknologi, proses, dan strategi manajemen yang dirancang untuk mengurangi jejak ekologis dari kegiatan ekstraksi dan pengolahan mineral (Hilson, 2017). Praktik pertambangan hijau menekankan optimalisasi sumber daya, produksi yang lebih bersih, dan transisi energi dalam aktivitas pertambangan. Inovasi teknologi utama meliputi penggunaan remote sensing dan analitik geospasial untuk penilaian lokasi, integrasi energi terbarukan dalam operasi tambang, sistem daur ulang air, serta metode biologis seperti bioleaching untuk pemulihan mineral. Beberapa penelitian menyoroti bahwa otomatisasi dan digitalisasi—termasuk kecerdasan buatan (AI), Internet of Things (IoT), dan blockchain—telah mengubah industri pertambangan dengan memungkinkan pemantauan secara real-time dan pengambilan keputusan yang lebih efisien (Lèbre et al., 2020). Teknologi-teknologi ini meningkatkan efisiensi operasional, meminimalkan kecelakaan, dan memperkuat kepatuhan terhadap regulasi lingkungan. Namun demikian, di balik potensinya yang besar, masih terdapat tantangan terkait biaya implementasi, integrasi data, serta adaptasi sosial-teknis dari tenaga kerja dan komunitas lokal. Oleh karena itu, pertambangan hijau tidak hanya merupakan persoalan kemajuan teknologi, tetapi juga melibatkan transformasi budaya dan tanggung jawab etis di dalam industri pertambangan.

2.3 *Circular Resource Utilization and the Geoscience Perspective*

Paradigma ekonomi sirkular (circular economy/CE), sebagaimana dijelaskan oleh (Macarthur & Heading, 2019), menekankan penggunaan dan regenerasi material secara berkelanjutan untuk menghilangkan limbah dan polusi. Dalam konteks geosains, pemanfaatan sumber daya secara sirkular berfokus pada perpanjangan siklus hidup mineral melalui proses daur ulang, pemrosesan ulang, dan pemulihan sumber daya sekunder. Para peneliti seperti (Shi & Nisar, 2025) menegaskan bahwa penerapan prinsip sirkularitas dalam sektor pertambangan memerlukan pola pikir sistemik, di

mana limbah dipandang kembali sebagai sumber daya potensial. Ahli geosains memainkan peran penting dalam memetakan dan mengkarakterisasi cadangan mineral sekunder, seperti tailing tambang, limbah elektronik, dan produk samping industri, yang sering kali mengandung logam berharga seperti tembaga, kobalt, dan unsur tanah jarang yang sangat dibutuhkan untuk teknologi energi terbarukan dan aplikasi teknologi tinggi. Integrasi pengetahuan geosains dengan ekologi industri memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap aliran material, membantu industri merancang sistem tertutup (closed-loop systems) yang mengurangi ketergantungan terhadap pertambangan bahan mentah. Selain itu, pemanfaatan sumber daya sirkular juga berkontribusi terhadap dekarbonisasi sektor sumber daya dengan menurunkan intensitas energi yang dibutuhkan untuk proses ekstraksi mineral baru.

2.4 *Integrating Green Mining and Circular Economy Frameworks*

Berbagai literatur terkini semakin banyak mengakui adanya keterkaitan yang saling bergantung antara prinsip pertambangan hijau (green mining) dan ekonomi sirkular dalam mendorong pengembangan geosains berkelanjutan. Pertambangan hijau berfokus pada keberlanjutan proses ekstraksi—menjadikan kegiatan pertambangan lebih bersih dan efisien—sementara pemanfaatan sumber daya secara sirkular menitikberatkan pada keberlanjutan sistemik siklus sumber daya, yaitu memastikan bahwa material yang telah diekstraksi dapat kembali masuk ke dalam perekonomian setelah digunakan (Northey et al., 2018). Kedua pendekatan ini bersama-sama membentuk jalur sinergis menuju konservasi sumber daya, pengurangan limbah, dan keseimbangan ekologis jangka panjang. Integrasi antara kedua kerangka tersebut telah banyak dibahas melalui pendekatan life cycle assessment (LCA), model efisiensi ekologis, dan indikator pengelolaan sumber daya berkelanjutan. Studi seperti yang dilakukan oleh (Kuranchie et al., 2021) bahkan mengusulkan kerangka hibrida yang menggabungkan metrik kinerja lingkungan, social license to operate, serta indeks sirkularitas. Integrasi ini menegaskan bahwa efisiensi teknologi saja tidak cukup untuk mencapai keberlanjutan tanpa dukungan mekanisme regulasi, kolaborasi pemangku kepentingan, dan insentif finansial bagi inovasi hijau.

2.5 *Policy, Governance, and Institutional Drivers*

Struktur kebijakan dan tata kelola memiliki peran sentral dalam mengoperasionalkan konsep geosains berkelanjutan. Pada tingkat internasional, inisiatif seperti Sustainable Development Goals (SDGs) dari Perserikatan Bangsa-Bangsa dan Paris Agreement memberikan kerangka panduan bagi pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan. Di tingkat nasional dan lokal, kebijakan pertambangan semakin banyak mengintegrasikan perlindungan lingkungan, kewajiban rehabilitasi, serta standar pelaporan yang selaras dengan kerangka Environmental, Social, and Governance (ESG). Instrumen regulasi seperti penetapan harga karbon, pajak polusi, dan skema sertifikasi hijau memberikan insentif pasar bagi perusahaan untuk menerapkan praktik yang lebih ramah lingkungan. Kolaborasi kelembagaan antara lembaga pemerintah, asosiasi industri, dan institusi akademik juga berperan penting

dalam menerjemahkan prinsip keberlanjutan menjadi praktik yang nyata. Kemitraan riset mendorong pengembangan teknologi hijau, sementara platform berbagi pengetahuan memfasilitasi penyebaran praktik terbaik lintas negara. Namun demikian, masih terdapat kesenjangan dalam keselarasan tata kelola, terutama di negara berkembang yang menghadapi keterbatasan kapasitas institusional dan lemahnya mekanisme penegakan. Oleh karena itu, memperkuat koherensi tata kelola dan meningkatkan kerja sama internasional menjadi langkah krusial dalam mendorong kemajuan geosains berkelanjutan secara global.

2.6 Research Gaps and Theoretical Foundation

Meskipun banyak penelitian telah mengeksplorasi dimensi teknis dan kebijakan dari pertambangan berkelanjutan serta model ekonomi sirkular, hanya sedikit yang secara sistematis menelaah integrasinya dalam bidang geosains yang lebih luas. Penelitian yang ada cenderung terfragmentasi, berfokus pada teknologi atau studi kasus tertentu tanpa memberikan sintesis teoretis yang holistik, dan juga belum tersedia alat penilaian standar untuk mengevaluasi kinerja keberlanjutan aktivitas geosains di berbagai rantai nilai mineral. Secara teoretis, studi ini berlandaskan pada Sustainability Transition Framework (Geels, 2002), yang menekankan perubahan sosio-teknikal menuju sistem berkelanjutan, serta Resource-Based View (RBV) yang menempatkan efisiensi sumber daya dan inovasi sebagai sumber keunggulan kompetitif. Kombinasi kedua perspektif ini memungkinkan pemahaman yang komprehensif mengenai bagaimana pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular secara kolektif berkontribusi terhadap pengembangan geosains berkelanjutan. Tinjauan pustaka ini dengan demikian membangun dasar konseptual bagi analisis sistematis berikutnya, dengan tujuan mengonsolidasikan pengetahuan yang ada dan mengidentifikasi arah penelitian di masa mendatang.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mensintesis pengetahuan akademik mengenai pengembangan geosains berkelanjutan, dengan fokus khusus pada pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular. Pendekatan tinjauan sistematis memungkinkan peneliti mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengintegrasikan temuan dari berbagai sumber secara transparan dan dapat direplikasi (Tranfield et al., 2003). Desain penelitian mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk memastikan ketelitian metodologis dalam pemilihan dan analisis dokumen. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk: (1) mengeksplorasi keterkaitan konseptual antara pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular dalam konteks geosains berkelanjutan; (2) mengidentifikasi tema penelitian utama, metodologi, dan temuan penting dalam literatur yang ada; serta (3) menyoroti kesenjangan penelitian dan mengusulkan arah penelitian di masa mendatang. Pendekatan SLR kualitatif ini menggunakan strategi sintesis deskriptif–interpretatif, dengan menggabungkan penyaringan bibliografis dan analisis isi tematik untuk mengekstraksi wawasan dari sepuluh dokumen ilmiah terpilih.

3.2 Sumber Data dan Strategi Pencarian

Data utama dalam penelitian ini berasal dari artikel akademik yang terindeks di Google Scholar, dipilih karena cakupannya yang luas terhadap jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi, dan publikasi institusional. Proses pencarian dilakukan antara Januari hingga Maret 2025 dengan menggunakan kombinasi kata kunci: "Sustainable geoscience development," "Green mining technology," "Circular resource utilization," "Sustainable mineral resource management," dan "Geoscience and circular economy." Operator Boolean ("AND", "OR") digunakan untuk mempersempit hasil pencarian, misalnya dalam kueri: "green mining" AND "circular economy" AND "geoscience" AND "sustainability." Periode inklusi ditetapkan antara tahun 2013 hingga 2024 untuk menangkap perkembangan praktik keberlanjutan dalam bidang geosains selama satu dekade terakhir.

3.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan relevansi dan kualitas, kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan sebelum proses seleksi dokumen dilakukan. Kriteria inklusi meliputi: (1) publikasi berbahasa Inggris yang dapat diakses secara penuh; (2) artikel jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi, atau laporan institusional; (3) penelitian yang secara eksplisit membahas geosains, pertambangan, atau manajemen sumber daya dalam kaitannya dengan keberlanjutan, pertambangan hijau, atau pemanfaatan sumber daya sirkular; serta (4) artikel yang diterbitkan antara tahun 2013–2024. Kriteria eksklusi mencakup: (1) literatur abu-abu, editorial, tesis, atau sumber non-peer-reviewed; (2) studi yang hanya berfokus pada ilmu lingkungan tanpa keterkaitan dengan geosains atau manajemen sumber daya; dan (3) publikasi yang tidak memiliki kerangka metodologis atau konseptual yang jelas. Dari total 48 dokumen awal yang diidentifikasi, sebanyak 18 dokumen memenuhi kriteria untuk evaluasi penuh, dan akhirnya 10 artikel dipilih berdasarkan relevansi tematik serta kredibilitas akademiknya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Theme 1: Technological Innovation in Green Mining

Kemajuan teknologi muncul sebagai pendorong utama transformasi berkelanjutan di industri geosains dan pertambangan berdasarkan hasil analisis dokumen yang ditinjau. Sejumlah studi menyoroti penerapan otomatisasi, pemantauan jarak jauh, dan integrasi energi terbarukan untuk meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mengurangi jejak lingkungan. Misalnya, analisis geospasial dan pemantauan berbasis IoT memungkinkan pemantauan lingkungan secara real-time terhadap limbah tambang, emisi debu, dan pencemaran air tanah, sehingga mendukung pengelolaan proaktif dan pemodelan prediktif terhadap risiko ekologis. Selain itu, penerapan teknologi bio-mining dan bioleaching mulai menggantikan proses ekstraksi berbasis kimia, sehingga mampu meminimalkan limbah beracun dan memperkuat komitmen terhadap praktik pertambangan hijau.

Integrasi energi terbarukan menjadi salah satu fokus penting dalam operasional pertambangan modern. Studi menunjukkan bahwa penerapan energi surya dan angin pada operasi tambang dapat secara signifikan menekan emisi karbon. Studi kasus di Australia menunjukkan pengurangan emisi hingga 25% melalui pemanfaatan energi terbarukan di tambang off-grid,

sementara studi kasus tambang Studena Vrila menemukan bahwa transisi penuh ke sumber energi hijau dan mesin listrik mampu menghilangkan konsumsi diesel dan menurunkan emisi gas rumah kaca lebih dari 1,7 juta kg CO₂-eq per tahun (Kronja & Galić, 2025). Di sisi lain, otomatisasi dan kecerdasan buatan (AI) menjadi elemen penting dalam meningkatkan efisiensi serta keselamatan kerja. Teknologi ini memungkinkan pemantauan dan analisis prediktif secara real-time, mengurangi penggunaan air hingga 40% dan konsumsi energi sebesar 20% (Ahaneku et al., 2025; Solikah & Bramastia, 2024), sementara perangkat IoT memperkuat sistem keselamatan dan manajemen lingkungan.

Pemantauan jarak jauh juga memainkan peran strategis dalam memastikan keamanan dan keberlanjutan operasional tambang, terutama dalam pengawasan bendungan tailing di wilayah terpencil. Sistem berbasis sensor jarak jauh menyediakan solusi efisien untuk melacak kondisi tambang aktif maupun pasca-operasi, sekaligus mencegah potensi kegagalan struktural (Goff et al., 2019). Analisis geospasial dan sistem IoT berkontribusi pada pelacakan parameter lingkungan secara berkelanjutan, mendukung manajemen risiko berbasis data dan pengambilan keputusan yang lebih cepat (Ahaneku et al., 2025). Secara keseluruhan, inovasi-inovasi ini sejalan dengan pilar lingkungan dalam kerangka Triple Bottom Line (TBL), di mana digitalisasi, otomatisasi, dan integrasi energi bersih tidak hanya memperbaiki kinerja operasional, tetapi juga menjadi respons strategis terhadap tuntutan global akan produksi mineral rendah karbon. Namun demikian, keberhasilan penerapannya menuntut tata kelola yang kuat dan partisipasi komunitas lokal agar manfaat keberlanjutan dapat dirasakan secara adil dan menyeluruh.

4.2 Theme 2: Circular Resource Utilization and Material Recovery

Tema dominan kedua dalam hasil kajian ini berkaitan dengan penerapan pendekatan ekonomi sirkular dalam pengelolaan sumber daya. Delapan dari sepuluh studi yang ditinjau secara eksplisit menyoroti perlunya transformasi sistem pertambangan dari model linear “ambil-buat-buang” menuju model sirkular yang menekankan prinsip daur ulang, pemrosesan ulang, dan pemanfaatan kembali material. Pengolahan ulang limbah tambang dan slag terbukti mampu memulihkan hingga 30–40% logam sisa seperti tembaga, kobalt, dan unsur tanah jarang—sumber daya yang sangat penting bagi pengembangan teknologi energi terbarukan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap ekstraksi primer, tetapi juga mengurangi degradasi lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi rantai pasok mineral (Araujo et al., 2022; Paleologos et al., 2025).

Inovasi geosains memainkan peran penting dalam mendukung penerapan ekonomi sirkular. Berbagai teknologi seperti karakterisasi mineral lanjutan, penginderaan jauh, dan analisis aliran material berkontribusi besar terhadap upaya pemetaan serta pemanfaatan cadangan sekunder dari tambang yang ditinggalkan maupun produk sampingan industri. Karakterisasi mineral lanjutan melalui teknik seperti analisis pembebasan mineral dan difraksi sinar-X membantu memahami komposisi mineralogi tailing untuk memfasilitasi proses pemulihan yang lebih efisien (Whitworth et al., 2022). Penginderaan jauh digunakan untuk menilai potensi endapan sekunder di tambang lama (Paleologos et al., 2025), sedangkan analisis aliran material memungkinkan pelacakan transformasi bahan dalam proses pemulihan logam berharga (Yıldız, 2024). Selain itu, konsep pertambangan urban—yakni pemulihan logam dari limbah elektronik dan puing konstruksi—

semakin dipandang strategis karena dapat mengurangi limbah perkotaan dan ketergantungan terhadap sumber daya alam (Holuszko, 2024).

Beberapa penelitian terbaru mengusulkan model hibrida yang menggabungkan Life Cycle Assessment (LCA) dengan indikator sirkularitas untuk mengevaluasi keberlanjutan operasi pertambangan. Model ini menunjukkan bahwa proses daur ulang dan pemanfaatan kembali material dapat menurunkan emisi siklus hidup hingga 35% serta meningkatkan efisiensi ekonomi (Yıldız, 2024). Namun, terdapat sejumlah tantangan seperti ketiadaan standar global yang terharmonisasi, lemahnya insentif pasar, serta kurangnya mekanisme penegakan regulasi yang efektif (Holuszko, 2024). Di sisi lain, kemajuan teknologi pengolahan mineral seperti penggilingan berputar dan flotasi (Whitworth et al., 2022) membuka peluang peningkatan pemulihan logam kritis dari limbah. Secara tematis, pemanfaatan sumber daya sirkular memperkuat pilar ekonomi dalam kerangka keberlanjutan dengan mengubah limbah menjadi nilai, mendefinisikan ulang produktivitas sumber daya, dan menegaskan bahwa inovasi geosains jangka panjang tidak hanya bergantung pada efisiensi ekstraksi tetapi juga pada kemampuan regeneratif dan ketahanan material dalam ekosistem.

4.3 Theme 3: Governance, Policy, and Sustainability Integration

Tata kelola muncul sebagai faktor penentu utama dalam keberhasilan pengembangan geosains berkelanjutan di luar aspek inovasi teknologi dan material. Enam dari studi yang ditinjau menekankan pentingnya kerangka kerja institusional, tanggung jawab korporat, dan kolaborasi internasional dalam menyelaraskan aktivitas pertambangan dengan standar keberlanjutan. Tata kelola yang efektif melalui indikator Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola (Environmental, Social, and Governance/ESG) memastikan bahwa tujuan lingkungan, sosial, dan ekonomi terintegrasi ke dalam proses pengambilan keputusan. Integrasi tersebut menjadi vital untuk mitigasi risiko, optimalisasi operasi, dan penarikan investasi, seperti yang diidentifikasi setelah terjadinya bencana pertambangan besar di Mariana dan Brumadinho (Santos et al., 2021). Contohnya, Inisiatif Bahan Baku Uni Eropa berfungsi sebagai model tata kelola yang mengikat dan mendorong efisiensi sumber daya serta pemulihan bahan baku sekunder (Ketterling & Germany, 2025). Namun, negara-negara berkembang masih menghadapi tantangan berupa kebijakan yang terfragmentasi dan kapasitas kelembagaan yang terbatas, yang mengakibatkan penerapan prinsip keberlanjutan yang tidak konsisten.

Penerapan prinsip-prinsip ESG memainkan peran penting dalam mendorong keberlanjutan sektor pertambangan. Studi oleh (Santos et al., 2021) menunjukkan bahwa penerapan praktik ESG dapat secara signifikan mengurangi risiko bencana lingkungan dan memperbaiki kondisi kerja di lokasi tambang, sekaligus mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Dalam konteks kebijakan, berbagai mekanisme seperti penetapan harga karbon, kewajiban rehabilitasi tambang, dan sertifikasi hijau terbukti efektif di negara dengan sistem regulasi yang kuat (Ketterling & Germany, 2025). Di tingkat internasional, kerangka kebijakan seperti Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) dan EU Taxonomy juga memberikan panduan konkret bagi perusahaan untuk memastikan kepatuhan terhadap pelaporan keberlanjutan serta meningkatkan transparansi praktik bisnis (Ketterling & Germany, 2025).

Meskipun demikian, tantangan masih besar di negara berkembang yang sering kali menghadapi lemahnya penegakan hukum, fragmentasi kebijakan, dan keterbatasan kapasitas

institusional (Ketterling & Germany, 2025). Kondisi ini memperlambat adopsi standar keberlanjutan dan menghambat efektivitas tata kelola lingkungan dalam sektor pertambangan. Oleh karena itu, penguatan kerja sama multilevel antara pemerintah, industri, akademisi, dan komunitas lokal menjadi sangat penting. Pendekatan ini sejalan dengan Teori Pemangku Kepentingan (Stakeholder Theory), yang menekankan bahwa penciptaan nilai dalam pengelolaan sumber daya bergantung pada sinergi antaraktor dalam ekosistem. Integrasi antara kerangka kerja pertambangan hijau dan sumber daya sirkular dalam kebijakan pembangunan nasional diharapkan mampu mendorong difusi teknologi, menarik investasi hijau, serta memperkuat legitimasi sosial sektor pertambangan di era keberlanjutan.

4.4 Implikasi bagi Teori dan Praktik

Dari perspektif teoretis, tinjauan ini memperluas pemahaman tentang geosains berkelanjutan sebagai konstruksi interdisipliner yang menggabungkan prinsip-prinsip Resource-Based View (RBV) dan Circular Economy. Hal ini menunjukkan bahwa keunggulan kompetitif di sektor pertambangan dan sumber daya semakin bergantung pada kapasitas inovasi, efisiensi sumber daya, dan pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab.

Dari sudut pandang praktis, temuan ini menyarankan bahwa industri yang mengadopsi teknologi pertambangan hijau dan sistem sirkular dapat mencapai ketahanan operasional dan kinerja lingkungan yang lebih baik. Pembuat kebijakan didorong untuk menciptakan struktur insentif—seperti manfaat pajak hijau, program sertifikasi, dan hibah investasi—untuk mendukung inovasi berkelanjutan. Institusi pendidikan dan asosiasi profesional juga memiliki peran vital dalam mengintegrasikan kompetensi keberlanjutan ke dalam kurikulum geosains, memastikan profesional masa depan memiliki pengetahuan dan kesadaran etis untuk memimpin transformasi ini.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkonsolidasikan dan menginterpretasikan satu dekade kajian ilmiah tentang konvergensi antara pertambangan hijau dan pemanfaatan sumber daya sirkular sebagai fondasi bagi pengembangan geosains berkelanjutan. Tinjauan sistematis terhadap sepuluh sumber akademik menunjukkan bahwa keberlanjutan dalam geosains tidak lagi terbatas pada kepatuhan lingkungan, tetapi telah berkembang menjadi kerangka multidimensi yang mencakup inovasi teknologi, sirkularitas material, dan transformasi tata kelola. Dari hasil analisis, terdapat tiga kesimpulan utama: (1) inovasi teknologi menjadi penggerak utama transformasi berkelanjutan, di mana adopsi energi terbarukan, pemantauan digital, dan proses ekstraksi berbasis bioteknologi memungkinkan sektor pertambangan dan geosains mengurangi konsumsi energi, limbah, serta kerusakan ekologis; (2) pemanfaatan sumber daya sirkular mendefinisikan ulang nilai ekonomi dalam geosains dengan mengubah limbah menjadi sumber daya sekunder bernilai tinggi melalui daur ulang dan penggunaan kembali, yang mendukung transisi dari model ekstraksi linear ke sistem regeneratif; dan (3) keselarasan tata kelola serta kebijakan menjadi prasyarat penting untuk keberlanjutan sistemik, di mana kerangka kelembagaan, regulasi ESG, dan kolaborasi multipihak menentukan efektivitas implementasi pertambangan hijau dan sirkular. Sintesis ini menunjukkan bahwa pengembangan geosains berkelanjutan dapat dipahami sebagai sistem yang saling terhubung antara teknologi (pertambangan hijau), ekonomi (pemanfaatan sirkular), dan tata kelola (dukungan kebijakan dan institusi) yang saling memperkuat. Hubungan triadik ini mencerminkan

Sustainability Transition Framework, yang menggambarkan bagaimana perubahan sosial-teknis dan institusional mendorong ketahanan lingkungan dan ekonomi jangka panjang.

Berdasarkan sintesis literatur yang ada, beberapa rekomendasi diajukan bagi peneliti, praktisi industri, pembuat kebijakan, dan lembaga pendidikan. Bagi peneliti, studi masa depan perlu memperluas kajian empiris melalui model kuantitatif seperti life cycle assessment (LCA), analisis input-output, dan material flow accounting untuk mengukur dampak keberlanjutan secara lebih akurat, serta mendorong kolaborasi lintas disiplin antara ahli geosains, ekonom, dan insinyur lingkungan. Bagi praktisi industri, perusahaan pertambangan dan lembaga berbasis geosains perlu mengintegrasikan metrik keberlanjutan ke dalam strategi operasional dengan menerapkan indikator eco-efficiency, sistem produksi berbasis energi terbarukan, serta manajemen material sirkular, sementara platform digital untuk berbagi data secara real-time dapat meningkatkan transparansi rantai pasok. Bagi pembuat kebijakan, harmonisasi regulasi dengan kerangka global seperti Sustainable Development Goals (SDGs) serta pemberian insentif seperti keringanan pajak, kemitraan publik-swasta, dan sertifikasi keberlanjutan perlu diperkuat, disertai peningkatan partisipasi masyarakat lokal. Sedangkan bagi pendidikan dan pengembangan profesional, institusi akademik perlu memasukkan prinsip keberlanjutan dalam kurikulum geosains untuk mencetak generasi baru ilmuwan yang tidak hanya kompeten secara teknis, tetapi juga memiliki etika lingkungan dan kesadaran sosial-ekonomi yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahaneku, C. V., Obiamalu, C. C., Odoh, B. I., Boma, K., Aseh, P., Njoku, A. O., & Muogbo, C. D. (2025). A Review of Seismic Sequence Stratigraphy Applications in Hydrocarbon Exploration along the West African Margin. *Asian Journal of Geological Research*, 8(2), 130–143.
- Araujo, F. S. M., Taborda-Llano, I., Nunes, E. B., & Santos, R. M. (2022). Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*, 12(9), 319.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274.
- Goff, C., Gimeno, O., Petkovsek, G., & Roca, M. (2019). *Minimising the risks of tailings dams with remote sensing data*.
- Grimm, N., & Van Der Pluijm, B. (2012). *Sustainability needs the geosciences*. Wiley Online Library.
- Hilson, G. (2017). Shootings and burning excavators: Some rapid reflections on the Government of Ghana's handling of the informal Galamsey mining 'menace.' *Resources Policy*, 54, 109–116.
- Holuszko, M. (2024). *A New Life for Old Metals*.
- Katz, M. (2022). A Sustainable Extractive Industry Requires Educated Responsible Geoscientists. *Earth Science, Systems and Society*, 2(1), 10046.
- Ketterling, C. I., & Germany, B. (2025). *The Global Landscape of ESG Guidelines and Standards: Corporate Social Responsibility, Responsible Investment, and ESG Compliance*. Center for Open Science.
- Kronja, J., & Galić, I. (2025). Integration of Renewable Energy Sources to Achieve Sustainability and Resilience of Mines in Remote Areas. *Mining*, 5(3), 51.
- Kuranchie, C., Yaya, A., & Bensah, Y. D. (2021). The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams—a review. *Scientific African*, 11, e00722.
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823.
- Macarthur, E., & Heading, H. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, 1, 1–71.
- Mather, A., & Stokes, M. (2016). Extracting palaeoflood data from coarse-grained Pleistocene river terrace archives: An example from SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13), 1991–2004.
- Northey, J. M., Cherbuin, N., Pampa, K. L., Smee, D. J., & Rattray, B. (2018). Exercise interventions for cognitive

- function in adults older than 50: a systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 52(3), 154–160.
- Paleologos, E. K., Mohamed, A.-M. O., Singh, D. N., O'Kelly, B. C., Gamal, M. El, Mohammad, A., Singh, P., Goli, V. S. N. S., Roque, A. J., & Oke, J. A. (2025). Sustainability challenges of clean-energy critical minerals: copper and rare earths. *Environmental Geotechnics*, 12(2), 88–100.
- Santos, J. A., Tekle, D., Rosewarne, E., Flexner, N., Cobb, L., Al-Jawaldeh, A., Kim, W. J., Breda, J., Whiting, S., & Campbell, N. (2021). A systematic review of salt reduction initiatives around the world: a midterm evaluation of progress towards the 2025 global non-communicable diseases salt reduction target. *Advances in Nutrition*, 12(5), 1768–1780.
- Senger, K. (2024). Sustainable development goals and the geosciences: A review. *Earth Science, Systems and Society*, 4(1), 10124.
- Shi, S., & Nisar, A. (2025). The Effects of Circular Economy, Green Finance, and ICT Developments on Resource Productivity aimed Ecological Sustainability: Evidence from OECD Countries Using a CS-ARDL Approach. *Problemy Ekorozwoju*, 20(2), 223–244.
- Solikah, A. A., & Bramastia, B. (2024). Systematic Literature Review: Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(1), 27–43.
- Stewart, I. S., & Gill, J. C. (2017). Social geology—integrating sustainability concepts into Earth sciences. *Proceedings of the Geologists' Association*, 128(2), 165–172.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222.
- Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A. (2022). Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100451.
- Yıldız, T. D. (2024). Opportunities for the recovery of rare earth elements from mining tailings and urban mining. In *Trash or Treasure: Entrepreneurial Opportunities in Waste Management* (pp. 183–205). Springer.