

**JITS**

Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains

E-ISSN: 3025-8871 | <https://jurnal.akipba.ac.id/index.php/JITS>

Perkembangan dan Implementasi *Electric Vehicle* pada Industri Pertambangan: Tinjauan Literatur Sistematis

Development and Implementation of Electric Vehicles in the Mining Industry: A Systematic Literature Review

Dimas Ghani Harsono Putra¹, Rika Ernawati²^{1,2} Magister Teknik Pertambangan, UPN "Veteran" Yogyakarta, Indonesia¹ 212251016@student.upnyk.ac.id, ² rika.ernawati@upnyk.ac.idPenulis Korespondensi: Dimas Ghani Harsono Putra | Email: 212251016@student.upnyk.ac.id

Diterima (Received): 11/08/2026 Direvisi (Revised): 14/08/2026 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 27/08/2026

ABSTRAK

Industri pertambangan merupakan sektor dengan intensitas energi fosil dan emisi karbon tinggi, terutama pada operasi armada angkut, sehingga elektrifikasi kendaraan tambang melalui *battery electric vehicle* (BEV) menjadi jalur dekarbonisasi penting untuk dikaji. Bukti mengenai kesiapan implementasi, produktivitas, biaya, dampak lingkungan, dan keselamatannya masih tersebar pada berbagai jenis tambang, konfigurasi teknologi, dan pendekatan metodologis yang berdiri terpisah. Penelitian ini bertujuan memetakan dan mensintesis perkembangan penelitian implementasi *electric vehicle* (EV) pada industri pertambangan, mengevaluasi dampaknya terhadap produktivitas, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan kerja, serta merumuskan kesenjangan dan agenda penelitian lanjutan. Tinjauan dilakukan dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR) mengikuti alur PRISMA 2020 terhadap artikel dari basis data bereputasi (*ScienceDirect*, *MDPI*, *IEEE Xplore*, *Springer*) periode 2019–2026. Melalui proses identifikasi, penyaringan judul-abstrak, penilaian kelayakan teks lengkap, dan *quality assessment*, 25 artikel diinklusi dalam sintesis tematik. Hasil menunjukkan lonjakan publikasi sejak 2023, dengan objek kajian meluas dari *haul truck* ke alat gali-muat. Elektrifikasi berpotensi meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan biaya operasi dan emisi, tetapi manfaatnya bergantung pada karakteristik operasi dan bauran listrik. Tantangan utama meliputi biaya infrastruktur pengisian, risiko keselamatan terkait kegagalan baterai dan ventilasi tambang bawah tanah, serta dampak tidak langsung terhadap umur jalan angkut. Kesenjangan penelitian paling menonjol adalah minimnya kerangka analisis yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan secara bersamaan. Secara keseluruhan, EV berpotensi layak pada kondisi operasional tertentu bergantung pada karakteristik tambang dan energi, sehingga implementasinya perlu dipertimbangkan sebagai transformasi sistem, bukan sekadar substitusi alat diesel.

Kata Kunci: Dekarbonisasi, Elektrifikasi, Kendaraan Listrik, Tinjauan Literatur Sistematis**ABSTRACT**

The mining industry has high fossil energy intensity and carbon emissions, particularly in haulage operations, making the electrification of mining vehicles through battery electric vehicles (BEVs) an important decarbonization pathway. Evidence on implementation readiness, productivity, costs, environmental impacts, and safety remains fragmented across mine types, technology configurations, and methodological approaches. This study aims to map and synthesize research on electric vehicle (EV) implementation in the mining industry, evaluate its impacts on productivity, economics, the environment, and occupational safety, and identify research gaps and future research directions. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA 2020 framework using articles published between 2019 and 2026 from ScienceDirect, MDPI, IEEE Xplore, and Springer. Following identification, title–abstract screening, full-text eligibility assessment, and quality assessment, 25 articles were included in the thematic synthesis. Results show a sharp increase in publications since 2023, with research expanding from haul trucks to loading and excavation equipment. Electrification has the potential to improve energy efficiency and reduce operating costs and emissions, but its benefits depend on operational characteristics and the electricity mix. Key challenges include charging infrastructure costs, battery-related safety risks, underground mine ventilation, and impacts on haul road service life. The main research gap is the lack of integrated frameworks addressing technical, economic, environmental, and safety aspects. Overall, EVs may be feasible under certain operating conditions depending on mine and energy characteristics, therefore implementation should be considered as part of comprehensive mine system transformation rather than merely replacing diesel equipment.

Keywords: Decarbonization, Electrification, Electric Vehicle, Systematic Literature Review

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

1. Pendahuluan

Industri pertambangan merupakan salah satu sektor dengan intensitas energi dan emisi karbon yang tinggi, terutama pada tahap operasi penambangan dan pengangkutan material. Armada *haul truck* bermesin diesel yang beroperasi hampir tanpa henti selama masa tambang menjadi salah satu kontributor terbesar konsumsi bahan bakar fosil sekaligus emisi gas rumah kaca pada rantai produksi mineral. Kondisi ini mendorong berbagai upaya dekarbonisasi, mulai dari integrasi energi terbarukan pada sistem kelistrikan tambang (Li et al., 2024), hingga perencanaan tambang strategis yang memasukkan opsi teknologi rendah karbon elektrifikasi, *biofuel*, kendaraan otonom, dan hydrogen sebagai bagian dari keputusan investasi jangka panjang (Davies, 2024).

Di antara berbagai jalur dekarbonisasi tersebut, elektrifikasi kendaraan operasional tambang melalui *battery electric vehicle* (BEV) menempati posisi yang semakin diperhitungkan. Berbeda dengan energi terbarukan yang lebih menysasar sisi pembangkitan, elektrifikasi bekerja langsung pada sisi penggunaan akhir sehingga berpotensi menghilangkan emisi gas buang di titik operasi, memperbaiki kualitas udara kerja, serta menurunkan beban panas pada terowongan tambang bawah tanah (Boa Morte et al., 2023). Sejumlah tinjauan literatur terdahulu telah mencoba memetakan alternatif elektrifikasi pada sistem pengangkutan tambang terbuka, mulai dari *trolley assist* yang telah terbukti secara komersial hingga *battery trolley* yang menggabungkan pengisian dinamis dan otomasi (Bao et al., 2023). Tinjauan lain berfokus pada penerapan BEV di tambang bawah tanah, dengan menyoroti manfaatnya terhadap kualitas udara dan beban ventilasi, sekaligus tantangan keselamatan seperti risiko thermal runaway dan kebakaran baterai (Kuslap et al., 2025).

Perkembangan riset pada topik ini menunjukkan tren yang semakin meluas namun juga terfragmentasi. Sebuah tinjauan sistematis terhadap manajemen energi armada tambang berhasil menyusun taksonomi teknologi mencakup pengurangan konsumsi diesel, *energy recovery*, elektrifikasi, integrasi energi terbarukan, hingga otomasi berbasis kecerdasan buatan dan merumuskan sembilan arah penelitian untuk mempercepat dekarbonisasi armada (Mesa et al., 2025). Taksonomi tersebut memperlihatkan bahwa kajian mengenai elektrifikasi tambang sesungguhnya tersebar pada berbagai sudut pandang yang berdiri agak terpisah satu sama lain: sebagian peneliti menekankan aspek lingkungan melalui *life cycle assessment* yang membandingkan dampak BEV dan diesel *truck* secara menyeluruh, bukan sekadar emisi gas buang (Balboa-Espinoza et al., 2023); sebagian lain menitikberatkan pada kelayakan ekonomi melalui simulasi biaya operasi dan investasi (Naseri et al., 2026; Tokac et al., 2025); sementara

kelompok lain lebih berkonsentrasi pada aspek teknis seperti pengukuran baterai dan sistem pengisian daya (Baranauskas et al., 2025; Hashemian et al., 2026).

Fragmentasi semacam ini menyisakan celah kajian yang belum banyak diisi, yaitu sintesis yang menghubungkan dimensi teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan implementasi EV tambang secara terpadu dalam satu kerangka analisis. Celah tersebut menjadi lebih terasa bila dikaitkan dengan konteks negara berkembang yang bauran listriknya masih didominasi energi fosil, sehingga manfaat emisi dari elektrifikasi kendaraan tidak dapat diasumsikan berlaku secara otomatis (Veza et al., 2023). Di Indonesia sendiri, kajian kelayakan teknis dan ekonomi transisi *dump truck* tambang batubara di Kalimantan Selatan menuju EV telah mulai dilakukan, termasuk pembahasan skema bisnis penyedia listrik dan keterkaitannya dengan target transisi energi nasional (Adi & Prihastha, 2026). Namun demikian, kajian tersebut masih bersifat studi kasus tunggal dan belum diposisikan dalam kerangka literatur global yang lebih luas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini disusun dengan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk memetakan dan mensintesis perkembangan penelitian mengenai implementasi *electric vehicle* pada industri pertambangan. Artikel ini bertujuan membandingkan hasil-hasil penelitian dari berbagai negara, jenis tambang, dan pendekatan metodologis, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan arah pengembangan pada masa mendatang. Secara spesifik, penelitian ini disusun untuk menjawab lima pertanyaan penelitian sebagai berikut: (1) bagaimana tren dan karakteristik penelitian mengenai implementasi EV pada industri pertambangan berkembang selama periode kajian; (2) bagaimana perkembangan teknologi baterai dan strategi pengisian daya pada kendaraan tambang; (3) bagaimana dampak elektrifikasi terhadap produktivitas, efisiensi energi, biaya, dan kinerja lingkungan; (4) apa saja tantangan keselamatan kerja dan kesiapan infrastruktur yang dihadapi dalam implementasinya; serta (5) apa kesenjangan penelitian yang masih terbuka dan arah penelitian yang relevan untuk dikembangkan selanjutnya.

2. Data dan Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengadaptasi alur PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) sebagai kerangka pelaporan proses seleksi literatur. Pendekatan SLR dipilih karena topik implementasi *electric vehicle* pada industri pertambangan bersifat multidisiplin mencakup dimensi teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan kerja sehingga memerlukan prosedur penelusuran dan penyaringan yang transparan agar sintesis yang dihasilkan dapat

dipertanggungjawabkan secara metodologis, sebagaimana juga ditempuh pada tinjauan sistematis serupa mengenai manajemen energi armada tambang (Mesa et al., 2025).

2.1. Data

Penelusuran literatur diarahkan pada basis data ilmiah bereputasi yang menerbitkan artikel-artikel rujukan penelitian ini, meliputi *ScienceDirect (Elsevier)*, MDPI, IEEE *Xplore*, *Springer*, dan basis data indeks daring lain yang menaungi jurnal-jurnal terkait energi, rekayasa pertambangan, dan transportasi berkelanjutan, sebagaimana tercermin dari sebaran penerbit ke-25 artikel yang dianalisis.

2.2. Kata Kunci dan Strategi Pencarian

Strategi pencarian disusun menggunakan kombinasi istilah utama dan operator Boolean, antara lain: ("*electric vehicle*" OR "*battery electric vehicle*" OR "*BEV*") AND ("*mining*" OR "*mine*" OR "*haul truck*") AND ("*electrification*" OR "*decarbonization*" OR "*energy consumption*" OR "*life cycle assessment*"). Kombinasi ini diperluas dengan istilah turunan seperti *charging infrastructure*, *regenerative braking*, *underground mining safety*, dan *techno-economic feasibility* untuk menjangkau artikel yang membahas aspek pendukung meskipun tidak secara eksplisit berfokus pada tambang.

2.3. Kriteria Inklusi

Artikel disertakan apabila memenuhi seluruh syarat berikut: (1) diterbitkan pada rentang tahun 2019–2026; (2) berbahasa Inggris; (3) berupa artikel jurnal, tinjauan (*review*), atau catatan teknis yang dapat diakses melalui DOI resmi; dan (4) membahas topik elektrifikasi kendaraan berat baik secara langsung pada konteks pertambangan, maupun secara tidak langsung melalui aspek teknologi baterai, kebijakan, atau dampak lingkungan kendaraan listrik yang relevan untuk diadaptasi ke konteks tambang.

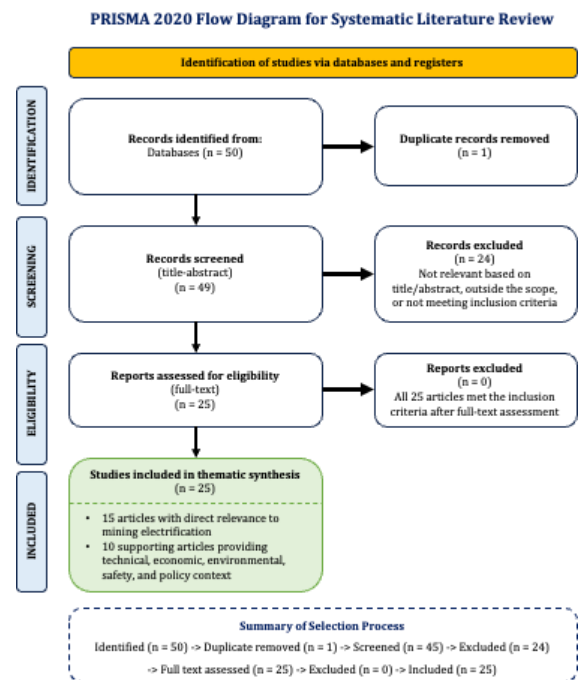
2.4. Kriteria Eksklusi

Artikel dikeluarkan apabila: (1) tidak memiliki keterkaitan tematik yang dapat dijelaskan dengan topik elektrifikasi tambang maupun konteks pendukungnya; (2) merupakan duplikasi dari artikel yang telah tercakup; (3) tidak menyediakan data atau argumentasi yang dapat diverifikasi melalui abstrak maupun isi artikel; atau (4) berupa opini tanpa dasar metodologis yang jelas.

2.5. Proses Seleksi (*Identification–Screening–Eligibility–Included*)

Proses seleksi literatur mengikuti empat tahap PRISMA 2020, yaitu *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *included*. Pada tahap identifikasi, diperoleh 50 artikel dari hasil penelusuran pada basis data yang digunakan. Selanjutnya, 1 artikel duplikat dihapus sehingga tersisa 49 artikel untuk tahap penyaringan. Pada tahap *screening*, penilaian dilakukan berdasarkan judul dan abstrak, dan sebanyak 24 artikel dikeluarkan karena tidak memiliki keterkaitan yang memadai dengan topik elektrifikasi

kendaraan pada industri pertambangan maupun konteks pendukung yang telah ditetapkan dalam kriteria inklusi. Dengan demikian, 25 artikel dilanjutkan ke tahap *eligibility* untuk dilakukan pemeriksaan terhadap teks lengkap.



Gambar 1 Alur Seleksi Literatur

Pada tahap *eligibility*, seluruh 25 artikel yang diperiksa memenuhi kriteria inklusi dan dapat digunakan dalam sintesis, sehingga tidak terdapat artikel yang dikeluarkan pada tahap pemeriksaan teks lengkap. Seluruh 25 artikel kemudian dimasukkan ke dalam sintesis tematik, yang terdiri atas 15 artikel dengan keterkaitan langsung terhadap elektrifikasi tambang dan 10 artikel pendukung yang memperkaya konteks teknis, ekonomi, lingkungan, keselamatan, dan kebijakan.

2.6. Quality Assessment

Penilaian kualitas dilakukan secara kualitatif dengan memperhatikan tiga aspek: (1) kejelasan tujuan dan metode penelitian yang digunakan tiap artikel (simulasi, studi kasus, tinjauan, *life cycle assessment*, atau analisis kebijakan); (2) kejelasan data dan parameter yang dilaporkan sehingga dapat dibandingkan lintas studi; dan (3) relevansi temuan terhadap pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan pada Bab 1. Artikel yang memenuhi ketiga aspek tersebut dengan baik ditempatkan sebagai rujukan inti pembahasan, sedangkan artikel pendukung digunakan sebagai pembanding atau kerangka kontekstual.

2.7. Sintesis Data

Mengingat besarnya heterogenitas metode antarstudi—mulai dari simulasi *discrete-event*, pemodelan *mixed-integer programming*, *life cycle assessment*, hingga

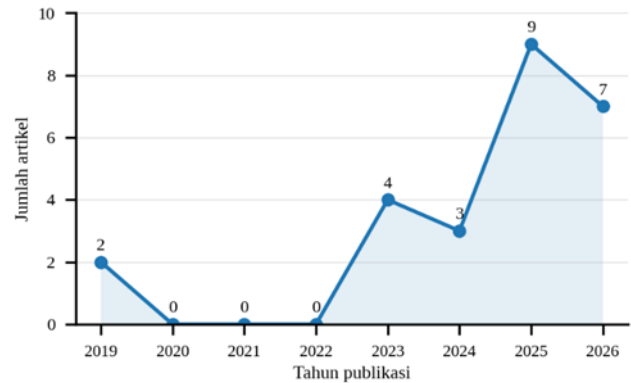
wawancara kualitatif—sintesis data dilakukan secara naratif-tematik (*thematic synthesis*), bukan meta-analisis kuantitatif. Temuan dari setiap artikel dikelompokkan ke dalam delapan tema pembahasan sebagaimana disajikan pada Bab 3, kemudian dibandingkan berdasarkan jenis kendaraan listrik, jenis tambang, metode penelitian, negara, teknologi baterai, metode pengisian daya, serta indikator produktivitas, energi, biaya, emisi, dan keselamatan kerja.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tren dan Karakteristik Penelitian EV pada Industri Pertambangan

Sebaran tahun terbit ke-25 artikel yang dikaji menunjukkan pola yang cukup jelas: penelitian mengenai elektrifikasi kendaraan tambang mulai konsisten muncul sejak 2019 (Naumanen et al., 2019; Zhang et al., 2019), namun mengalami lonjakan signifikan pada rentang 2023–2026, ketika lebih dari tiga perempat artikel rujukan diterbitkan. Pola ini konsisten dengan pemetaan bibliometrik yang menunjukkan bahwa manajemen energi armada tambang tengah bertransformasi dari isu teknis semata menjadi agenda dekarbonisasi yang lebih luas, mencakup otomasi dan integrasi energi terbarukan (Mesa et al., 2025).

Secara geografis, kajian tersebar pada konteks yang beragam: Chile untuk studi *life cycle assessment* tambang bawah tanah (Balboa-Espinoza et al., 2023), Afrika Selatan untuk tantangan energi-air pada ekstraksi logam sekaligus jalur dekarbonisasi armada tambang batubara (Ndlovu & Adewuyi, 2025; Yu et al., 2024), Australia untuk perbandingan *total cost of ownership* kendaraan berat nir-emisi (Naseri et al., 2026), serta Uni Eropa dan Kanada untuk uji lapangan konsumsi energi BEV pada tambang bawah tanah operasional (Halim et al., 2026). Studi di Amerika Serikat menyoroti aspek keselamatan ventilasi pada tambang emas Turquoise Ridge (Kahraman & Düzgün, 2026), sementara konteks Indonesia diwakili oleh kajian *techno-economic* transisi *dump truck* batubara di Kalimantan Selatan (Adi & Prihastha, 2026) dan perbandingan emisi ICE-HEV-PHEV-EV yang mempertimbangkan karakteristik bauran listrik nasional (Veza et al., 2023).



Gambar 2 Tren tahun publikasi artikel yang disintesis

Dari sisi jenis tambang, mayoritas studi inti berfokus pada tambang terbuka (*open-pit*) dengan objek utama *haul truck* (Bao et al., 2023; Tokac et al., 2025; Yu et al., 2024), diikuti oleh studi tambang bawah tanah yang menonjolkan aspek keselamatan dan efisiensi energi dalam ruang terbatas (Balboa-Espinoza et al., 2023; Halim et al., 2026; Hashemian et al., 2026; Kahraman & Düzgün, 2026). Sebagian kecil memperluas objek kajian di luar *haul truck*, misalnya pada alat gali-muat jenis *electric shovel* (Chen et al., 2025), menunjukkan bahwa perhatian penelitian mulai bergeser dari sekadar kendaraan angkut menuju elektrifikasi armada tambang secara menyeluruh.

Keragaman metode penelitian juga mencolok. Beberapa studi mengandalkan simulasi berbasis kejadian diskrit (*discrete-event simulation*) untuk membandingkan performa armada diesel dan listrik (Tokac et al., 2025), sementara yang lain menggunakan pemrograman optimasi campuran (*mixed-integer programming*) untuk merancang jalur dekarbonisasi berbiaya minimum (Yu et al., 2024). Pendekatan *life cycle assessment* digunakan untuk menilai dampak lingkungan menyeluruh (Balboa-Espinoza et al., 2023), sedangkan pendekatan kualitatif berbasis wawancara dan analisis konten digunakan untuk memahami hambatan adopsi dari perspektif pemangku kepentingan (Foda & Mohamed, 2026). Kombinasi metode simulasi dinamika benda dan pengujian eksperimental turut digunakan pada evaluasi konsumsi energi alat gali-muat (Chen et al., 2025). Variasi metodologis ini menegaskan bahwa topik elektrifikasi tambang tidak dapat didekati dengan satu kerangka analisis tunggal, melainkan memerlukan sintesis lintas metode sebagaimana dilakukan pada bagian pembahasan berikut.

3.2. Perkembangan Teknologi *Battery Electric Vehicle*

Perkembangan teknologi baterai pada kendaraan tambang tidak dapat dilepaskan dari lanskap teknologi kendaraan listrik berat secara global. Analisis lebih dari 25.000 publikasi dan paten menggunakan *Latent Dirichlet Allocation* mengidentifikasi delapan tema teknologi utama kendaraan listrik berat, meliputi operasi kendaraan, kontrol, motor, *thermal management*, modul dan kimia baterai, infrastruktur, serta sistem pengisian daya, dengan pola penguasaan paten yang berbeda antara China, Uni Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat (Naumanen et al., 2019). Peta teknologi tersebut menjadi latar bagi pilihan-pilihan teknis yang kemudian diadaptasi ke konteks tambang.

Pada tingkat kimia baterai, studi konfigurasi penyimpanan energi untuk *dump truck* otonom pada operasi reklamasi tambang batubara membandingkan tiga alternatif, yaitu baterai *nickel manganese cobalt/nickel cobalt aluminium* (NMC/NCA), *lithium iron phosphate* (LFP), dan kombinasi LFP dengan *supercapacitor*. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi LFP-supercapacitor memberikan konsumsi energi spesifik terendah serta dinilai lebih aman dan tahan siklus untuk kondisi operasi tambang yang berat (Shishkin et al., 2025). Temuan ini sejalan dengan tinjauan mengenai BEV bawah tanah yang juga membandingkan karakteristik baterai *lithium iron phosphate* dan *nickel manganese cobalt*, dengan menyoroti pertimbangan keselamatan sebagai faktor penentu pemilihan kimia baterai, bukan semata efisiensi energi (Kuslap et al., 2025).

Pada aspek pengisian daya, terdapat tiga pendekatan utama yang berulang kali dibahas dalam literatur: *fast charging*, *battery swapping*, dan *trolley-assist* atau *overhead charging*. Kerangka optimasi terpadu untuk *underground mining electric truck* membandingkan ketiga alternatif tersebut dengan mempertimbangkan *payload*, laju pengisian, degradasi baterai, *regenerative braking*, produktivitas, dan *net present cost*, menghasilkan batas Pareto yang menunjukkan bahwa pilihan teknologi optimal berubah mengikuti kondisi teknis dan ekonomi masing-masing tambang tidak ada satu solusi pengisian daya yang unggul secara universal (Hashemian et al., 2026). Pada konteks tambang terbuka, *trolley assist* dipandang sebagai teknologi transisi yang telah terbukti secara komersial, sementara *battery trolley* yang memadukan BEV, pengisian dinamis, otomasi, dan *energy recovery* berpotensi mengarah pada operasi tanpa emisi langsung sepenuhnya (Bao et al., 2023). Studi kelayakan di Indonesia turut memperkuat gambaran ini dengan menyoroti kebutuhan daya, profil beban operasi, serta standar *fast charging* GB/T sebagai bagian dari analisis infrastruktur kelistrikan pendukung transisi EV tambang batubara (Adi & Prihastha, 2026).

Efisiensi pemanfaatan energi baterai juga sangat dipengaruhi oleh strategi *regenerative braking*. Pemodelan empat strategi *regenerative braking* pada *pure electric mining dump truck* berpenggerak empat roda menunjukkan penurunan konsumsi energi sekitar 1,06–1,56%, yang dapat meningkat hingga 4,76–5,73% apabila *rolling resistance* jalan angkut diturunkan dari 0,04 menjadi 0,02 (Zhang et al., 2019). Temuan ini mengindikasikan bahwa desain jalan angkut dan kondisi permukaan jalan tambang sama pentingnya dengan teknologi baterai itu sendiri dalam menentukan efisiensi energi kendaraan Listrik sebuah aspek yang kerap luput dari perhatian jika elektrifikasi hanya dipandang sebagai persoalan penggantian *powertrain* semata.

3.3. Dampak Terhadap Produktivitas dan Efisiensi Energi

Salah satu temuan paling konsisten dalam literatur yang dikaji adalah bahwa keunggulan efisiensi energi BEV terhadap kendaraan diesel jauh lebih besar dibandingkan perkiraan teoritis awal. Uji lapangan pada beberapa tambang bawah tanah di Uni Eropa dan Kanada menunjukkan rasio konsumsi energi BEV terhadap diesel berada pada kisaran 1:4 hingga 1:6 untuk lintasan yang mendekati horizontal, dan meningkat menjadi 1:7 hingga 1:9 pada lintasan menanjak, jauh lebih baik dibandingkan perkiraan teoritis sebesar 1:3. Selisih ini dijelaskan oleh efisiensi *drivetrain* BEV secara keseluruhan yang lebih tinggi serta kontribusi *regenerative braking* (Halim et al., 2026). Temuan ini memperkuat argumen bahwa membandingkan BEV dan diesel semata dari kapasitas energi baterai versus volume tangki bahan bakar akan menghasilkan estimasi yang terlalu konservatif terhadap manfaat sesungguhnya.

Karakteristik topografi dan pola operasi jalan angkut terbukti menjadi variabel penentu besarnya manfaat elektrifikasi, bukan sekadar faktor pelengkap. Validasi metode penghitungan penghematan bahan bakar dan produktivitas pada tiga tambang terbuka dengan profil berbeda menunjukkan bahwa konfigurasi *series hybrid* mampu menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 17%, *trolley assist* hingga 91%, sementara konfigurasi *trolley-electric* justru meningkatkan produktivitas hingga 26%. Pada profil operasi *empty uphill-loaded downhill*, pemanfaatan *regenerative braking* bahkan memungkinkan kendaraan beroperasi tanpa memerlukan pengisian daya eksternal tertentu (Baranauskas et al., 2025). Hasil ini menegaskan bahwa kemiringan jalan angkut, arah muatan, jarak tempuh, dan *duty cycle* operasi tambang menjadi determinan utama kelayakan teknis elektrifikasi, sebuah kondisi yang tidak selalu berlaku seragam antartambang, sehingga generalisasi hasil satu studi ke konteks tambang lain perlu dilakukan secara hati-hati.

Manfaat efisiensi energi juga terlihat pada elektrifikasi alat gali-muat, memperluas cakupan pembahasan dari sekadar kendaraan angkut. Pada *mining electric shovel*,

pengurangan kecepatan penggalian secara moderat memperbaiki kualitas hasil galian sekaligus efisiensi energi, sementara pemanfaatan *feedback power* menurunkan konsumsi energi per unit produksi hingga 22,66% dan konsumsi energi *slewing* hingga 86,17% pada kondisi muatan penuh (Chen et al., 2025). Konsistensi temuan mengenai peran *regenerative braking* dan *feedback power* pada dua jenis alat berbeda *haul truck* (Zhang et al., 2019) dan *electric shovel* (Chen et al., 2025) menunjukkan bahwa pemanfaatan energi hasil pengereman dan perlambatan merupakan prinsip efisiensi yang berlaku lintas jenis peralatan tambang, bukan sekadar fitur spesifik satu produk.

Meskipun demikian, manfaat *regenerative braking* tidak selalu berbanding lurus dengan muatan. Pemodelan neraca energi *autonomous electric dump truck* pada operasi reklamasi tambang batubara dengan pola *loaded downhill* menunjukkan bahwa pada kemiringan turun 13%, energi bersih per siklus justru menurun seiring peningkatan *payload*, bahkan dapat menjadi negatif pada muatan di atas 110-ton karena kontribusi *regenerative braking* yang signifikan (Shishkin et al., 2025). Temuan ini melengkapi dan pada titik tertentu menantang asumsi umum bahwa muatan yang lebih besar selalu berarti kebutuhan energi yang lebih tinggi; pada kondisi topografi tertentu, hubungan tersebut dapat berbalik.

3.4. Analisis Kelayakan Ekonomi

Dari sisi kelayakan ekonomi, simulasi pada tambang terbuka menggunakan pendekatan *discrete-event simulation* menunjukkan bahwa elektrifikasi armada mampu menurunkan emisi gas rumah kaca hingga 92,6% serta biaya operasi sekitar 40–62% pada kasus hipotetis yang dikaji (Tokac et al., 2025). Angka ini tergolong sangat signifikan, namun penulis studi tersebut secara eksplisit menekankan bahwa hasil tetap bergantung pada bauran listrik yang digunakan, tingkat produktivitas, kapasitas baterai, dan keandalan sistem, sehingga tidak dapat digeneralisasi tanpa mempertimbangkan konteks operasional masing-masing tambang.

Perbandingan kelayakan ekonomi turut diperkaya oleh studi *total cost of ownership* (TCO) di luar konteks tambang, yang membandingkan truk *battery-electric*, *fuel-cell*, dan diesel untuk angkutan berat di Australia. Truk *battery-electric* dinilai lebih kompetitif untuk pola operasi *back-to-base* dengan jarak tempuh harian yang relatif tetap, sementara truk *fuel-cell* dinilai lebih sesuai untuk perjalanan jarak jauh (Naseri et al., 2026). Pola operasi tambang yang umumnya bersifat *back-to-base* dengan rute berulang dalam area terbatas mengindikasikan bahwa temuan ini relevan sebagai justifikasi tambahan mengapa BEV, dibandingkan *fuel-cell*, lebih banyak menjadi fokus penelitian elektrifikasi tambang dibandingkan alternatif hidrogen.

Pada perencanaan armada jangka panjang, pendekatan *mixed-integer programming* untuk menentukan jalur dekarbonisasi berbiaya siklus hidup minimum pada armada truk tambang batubara di Afrika Selatan menunjukkan bahwa urutan investasi elektrifikasi sangat dipengaruhi oleh biaya lahan, anggaran tahunan, harga karbon, dan karakteristik regional (Yu et al., 2024). Hal ini menegaskan bahwa kelayakan ekonomi elektrifikasi tambang bukan semata perbandingan biaya per unit energi antara diesel dan listrik, melainkan juga fungsi dari kebijakan fiskal dan kondisi ekonomi wilayah tempat tambang beroperasi.

Studi kelayakan *techno-economic* di Indonesia memberi ilustrasi konkret bagaimana faktor-faktor tersebut dipertimbangkan dalam praktik. Kajian transisi *dump truck* tambang batubara di Kalimantan Selatan menggunakan indikator *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), *benefit-cost ratio*, dan *payback period* untuk menilai kelayakan investasi, sekaligus membahas skema bisnis penyedia listrik dan efisiensi biaya operator tambang dalam kerangka target transisi energi nasional (Adi & Prihastha, 2026). Pertimbangan serupa mengenai pembagian subsidi antara kendaraan dan infrastruktur pengisian daya juga muncul sebagai prioritas riset kebijakan pada kajian *low-carbon trucking* secara lebih luas (Dua & Almutairi, 2025), mengindikasikan bahwa kelayakan ekonomi BEV tambang tidak dapat dilepaskan dari desain kebijakan insentif di tingkat nasional maupun sektor.

Secara keseluruhan, sintesis kelayakan ekonomi pada subbab ini memperlihatkan pola yang konsisten: elektrifikasi tambang secara teknis dapat memberikan penghematan biaya operasi yang substansial, tetapi kelayakannya sangat bergantung pada konteks lokal, mulai dari pola operasi, harga energi, kebijakan karbon, hingga skema pembiayaan infrastruktur. Sehingga generalisasi hasil satu studi ke tambang lain memerlukan penyesuaian asumsi yang cermat.

3.5. Dampak Lingkungan

Kajian dampak lingkungan implementasi EV pada industri pertambangan menunjukkan gambaran yang lebih kompleks dibandingkan asumsi sederhana bahwa kendaraan listrik selalu lebih ramah lingkungan dibandingkan diesel. Studi *life cycle assessment* yang membandingkan *battery-electric truck* dan *diesel truck* pada tambang bawah tanah hipotetis di Chile, dengan satuan fungsional satu ton material yang diangkut sejauh satu kilometer dan penilaian dampak menggunakan metode ReCiPe 2016, menemukan bahwa truk diesel menunjukkan dampak yang lebih tinggi pada kategori pemanasan global dan penipisan lapisan ozon. Namun demikian, truk listrik justru dapat memiliki dampak yang lebih tinggi pada pembentukan partikulat dan konsumsi air, bergantung pada bauran pembangkit listrik yang

digunakan (Balboa-Espinoza et al., 2023). Temuan ini menjadi salah satu bukti paling jelas bahwa keunggulan lingkungan BEV bukan sesuatu yang otomatis, melainkan berpindah dari satu kategori dampak ke kategori dampak lain sesuai dengan sumber energi listriknya.

Pola serupa terlihat pada kajian yang membandingkan emisi daur hidup kendaraan konvensional (ICEV), kendaraan listrik baterai (BEV), dan kendaraan sel bahan bakar (FCEV) di beberapa negara Eropa Tengah. Hasilnya menunjukkan bahwa intensitas karbon jaringan listrik menjadi faktor dominan penentu manfaat iklim BEV; pada intensitas karbon jaringan sekitar 600 gCO₂/kWh, manfaat iklim BEV dapat hilang sepenuhnya dibandingkan ICEV. Studi ini juga memperkirakan bahwa emisi dari proses produksi baterai menyumbang sekitar 16% dari total jejak daur hidup BEV (Brousek et al., 2026). Meskipun bukan studi pertambangan, temuan ini memperkuat kebutuhan untuk menilai *electric mining vehicle* menggunakan pendekatan *well-to-wheel* atau daur hidup penuh, bukan sekadar penghitungan emisi pada titik penggunaan kendaraan.

Relevansi temuan tersebut terlihat jelas pada konteks Indonesia, yang bauran listriknya masih didominasi pembangkit berbahan bakar fosil. Perbandingan antara ICE, HEV, PHEV, dan EV pada konteks Indonesia menemukan bahwa EV memang menghasilkan emisi CO dan CO₂ yang lebih rendah dibandingkan kendaraan berbahan bakar konvensional, tetapi emisi NO_x, N₂O, SO_x, dan PM₁₀ yang berasal dari proses pembangkitan listrik tetap tinggi akibat ketergantungan pada energi fosil (Veza et al., 2023). Temuan ini menjadi pengingat penting bagi rencana elektrifikasi tambang di Indonesia termasuk kajian *techno-economic* transisi *dump truck* di Kalimantan Selatan (Adi & Prihastha, 2026), bahwa manfaat lingkungan penuh dari elektrifikasi baru akan tercapai apabila berjalan beriringan dengan transisi bauran energi pembangkitan listrik nasional, sejalan dengan kerangka sistemik yang menempatkan elektrifikasi sebagai bagian dari transformasi energi yang lebih luas, bukan solusi yang berdiri sendiri (Boa Morte et al., 2023).

Sebagai pembanding, hasil simulasi pada tambang terbuka yang melaporkan penurunan emisi gas rumah kaca hingga 92,6% melalui elektrifikasi armada (Tokac et al., 2025) perlu dibaca dalam kerangka yang sama: angka tersebut kemungkinan mencerminkan skenario dengan bauran listrik yang relatif bersih, dan tidak serta-merta dapat digeneralisasi ke tambang dengan sumber listrik yang lebih bergantung pada batubara atau generator diesel setempat. Sintesis dari ketiga kelompok studi ini menegaskan satu simpulan yang konsisten: efektivitas elektrifikasi tambang dalam menurunkan emisi sepenuhnya bergantung pada kualitas dan sumber energi listrik yang memasok proses pengisian daya, sehingga kajian dampak lingkungan EV tambang idealnya selalu

disertai informasi mengenai karakteristik bauran listrik setempat, sebuah aspek yang belum konsisten dilaporkan pada seluruh studi yang dikaji.

3.6. Keselamatan Kerja

Aspek keselamatan kerja menjadi dimensi yang membedakan elektrifikasi tambang bawah tanah dari elektrifikasi kendaraan berat pada umumnya, mengingat kondisi ruang kerja yang terbatas dan bergantung pada sistem ventilasi mekanis. Studi simulasi terintegrasi yang mengevaluasi penggabungan BEV dengan sistem *ventilation-on-demand* di Turquoise Ridge Mine menggunakan pemodelan *haulage*, simulasi kejadian diskrit, analisis spasial-temporal, dan pemodelan ventilasi menemukan bahwa BEV memang menurunkan beban panas (*heat load*) dan emisi di area kerja. Namun, temuan yang menarik adalah bahwa keselamatan ventilasi pada praktiknya lebih banyak dikendalikan oleh batas kecepatan aliran udara dibandingkan oleh konsentrasi gas maupun panas semata. Pengurangan laju aliran udara (*airflow*) hingga 20% dinilai masih layak secara keselamatan dan berkaitan dengan penurunan emisi CO₂ dari kebutuhan daya ventilasi sekitar 47% (Kahraman & Düzgün, 2026). Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa manfaat BEV terhadap sistem ventilasi tidak dapat diasumsikan otomatis mengikuti penurunan emisi gas buang, melainkan harus dievaluasi melalui parameter keselamatan ventilasi yang berlaku secara independen.

Manfaat serupa terhadap kondisi kerja juga dikonfirmasi oleh uji lapangan BEV pada beberapa tambang bawah tanah di Uni Eropa dan Kanada, yang melaporkan bahwa BEV menghasilkan panas yang lebih rendah dibandingkan peralatan diesel ekuivalen, sekaligus menghilangkan *diesel exhaust* dan *diesel particulate matter* dari area kerja (Halim et al., 2026). Kombinasi pengurangan panas dan peniadaan gas buang diesel ini menjadi salah satu argumen kesehatan kerja paling kuat yang mendukung elektrifikasi tambang bawah tanah, di luar pertimbangan emisi karbon maupun efisiensi energi.

Meskipun demikian, elektrifikasi tambang bawah tanah memunculkan profil risiko baru yang berbeda dari risiko diesel konvensional. Tinjauan komprehensif mengenai BEV pada tambang bawah tanah mengidentifikasi sejumlah tantangan keselamatan spesifik, meliputi keterbatasan jarak operasi, kebutuhan infrastruktur pengisian daya, biaya awal investasi, serta risiko *thermal runaway*, kebakaran baterai, dan pelepasan gas beracun akibat kegagalan sel baterai. Tinjauan ini merekomendasikan penilaian risiko yang komprehensif, sistem mitigasi kebakaran khusus, pelatihan pekerja, dan standar keselamatan yang disesuaikan dengan karakteristik tambang (Kuslap et al., 2025). Rekomendasi tersebut selaras dengan temuan mengenai pemilihan kimia baterai LFP dibandingkan NMC/NCA yang turut mempertimbangkan aspek keamanan dan ketahanan

siklus, bukan semata efisiensi energi per unit produksi (Shishkin et al., 2025).

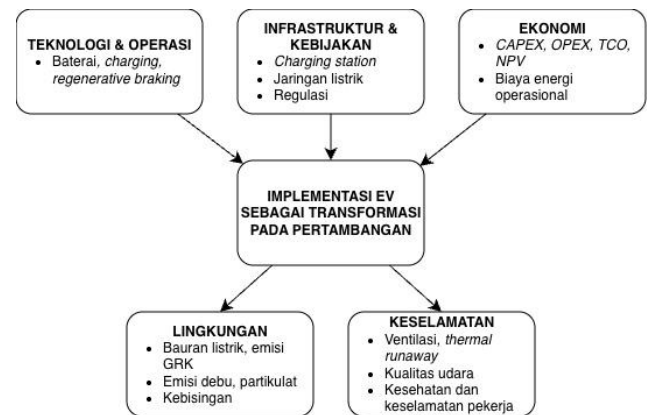
Bila dibaca secara bersamaan, ketiga kelompok temuan pada subbab ini memperlihatkan bahwa keselamatan kerja pada elektrifikasi tambang bawah tanah bersifat dua sisi: di satu sisi, BEV secara nyata memperbaiki kualitas udara dan menurunkan beban panas kerja (Halim et al., 2026; Kahraman & Düzgün, 2026); di sisi lain, teknologi ini menghadirkan risiko baru terkait kegagalan baterai yang memerlukan sistem mitigasi dan standar keselamatan tersendiri (Kuslap et al., 2025). Implikasinya, keputusan elektrifikasi armada tambang bawah tanah tidak dapat semata didasarkan pada perhitungan emisi dan efisiensi energi, melainkan harus disertai kajian keselamatan ventilasi dan manajemen risiko kebakaran baterai secara terintegrasi sejak tahap perencanaan.

3.7. Tantangan dan Peluang Implementasi

Perkembangan teknologi baterai pada kendaraan tambang tidak dapat dilepaskan dari lanskap teknologi kendaraan Listrik. Tantangan implementasi EV pada industri pertambangan tidak berhenti pada aspek teknis kendaraan, melainkan meluas ke infrastruktur pendukung dan kesiapan kelembagaan. Salah satu tantangan yang jarang disorot namun berdampak nyata adalah beban tambahan bobot baterai terhadap infrastruktur jalan. Kajian mengenai truk listrik berat pada angkutan perkotaan menemukan bahwa peningkatan beban ganda akibat bobot baterai dapat mengurangi umur layanan perkerasan jalan hingga sekitar 50%, sehingga sebagian manfaat emisi yang diperoleh dapat berkurang akibat kebutuhan rehabilitasi jalan yang lebih sering serta kenaikan konsumsi energi pada permukaan jalan yang memburuk (Chen & Xue, 2025). Meskipun konteksnya adalah jalan perkotaan, temuan ini relevan untuk tambang terbuka yang mengandalkan jalan angkut (*haul road*) sebagai infrastruktur vital, biaya pemeliharaan jalan akibat bobot BEV perlu dimasukkan ke dalam perhitungan kelayakan ekonomi elektrifikasi secara menyeluruh, sesuatu yang belum banyak dibahas eksplisit pada studi-studi tambang yang dikaji.

Pada tingkat kelembagaan, penelitian kualitatif terhadap 24 organisasi menggunakan wawancara semi-terstruktur dan analisis konten mengidentifikasi 12 tema utama dan 68 subtema hambatan serta faktor pendukung adopsi kendaraan berat nir-emisi, mencakup biaya, teknologi, infrastruktur, kebijakan, ketersediaan data, pengetahuan, dan operasi armada. Berdasarkan temuan tersebut, dirumuskan lima kelompok intervensi: dukungan finansial, kemajuan teknologi, regulasi yang spesifik terhadap sektor, perangkat perencanaan-operasional, serta mekanisme berbagi data dan peningkatan kesadaran (Foda & Mohamed, 2026). Kerangka intervensi ini, meskipun disusun untuk konteks armada berat secara umum, dapat diadaptasi langsung ke sektor pertambangan mengingat

kemiripan karakteristik operasional pola *back-to-base*, kebutuhan investasi besar, dan ketergantungan pada infrastruktur pengisian daya khusus.



Gambar 3 Kerangka *integrative* faktor implementasi EV pada industri pertambangan

Pada level kebijakan yang lebih makro, kajian perspektif mengenai prioritas riset kebijakan dan ekonomi untuk mempercepat *low-carbon trucking* merumuskan sejumlah agenda utama: pengembangan *high-power charging* dan *battery swapping*, standarisasi baterai serta perangkat pengisi daya, model bisnis infrastruktur, pembagian subsidi antara kendaraan dan infrastruktur, serta penyelarasan regulasi emisi gas buang dengan pendekatan emisi daur hidup (Dua & Almutairi, 2025). Agenda tersebut sejalan dengan kebutuhan yang teridentifikasi pada studi kelayakan PLN di Kalimantan Selatan, yang juga menyoroti pentingnya skema bisnis penyedia listrik sebagai prasyarat elektrifikasi tambang batubara di Indonesia (Adi & Prihastha, 2026).

Sementara itu, peluang implementasi EV tambang tidak dapat dilihat secara terisolasi, melainkan perlu ditempatkan dalam kerangka perencanaan tambang strategis yang lebih luas. Dekarbonisasi disarankan menjadi proses yang berulang sepanjang umur tambang, mencakup evaluasi terpadu terhadap pemilihan teknologi, rancangan tambang, jadwal produksi, rute angkut, kebutuhan energi, serta perubahan kondisi pasar dan kebijakan (Davies, 2024). Pendekatan perencanaan bertahap ini juga tecermin dari studi jalur dekarbonisasi armada tambang batubara di Afrika Selatan, yang menegaskan bahwa urutan investasi elektrifikasi sangat dipengaruhi kondisi regional dan anggaran tahunan (Yu et al., 2024). Peluang ini akan semakin terbuka apabila diiringi integrasi energi terbarukan pada sistem kelistrikan tambang (Li et al., 2024) serta strategi pengelolaan sumber daya energi-air secara sirkular sebagaimana diusulkan pada konteks industri ekstraksi logam di Afrika Selatan (Ndlovu & Adewuyi, 2025) menegaskan bahwa elektrifikasi

kendaraan tambang paling optimal ketika menjadi bagian dari transformasi sistem energi tambang secara menyeluruh, bukan inisiatif yang berdiri sendiri.

3.8. Research Gap

Sintesis lintas subbab di atas memperlihatkan sejumlah kesenjangan penelitian yang konsisten muncul, baik secara eksplisit dinyatakan oleh penulis studi terkait maupun teridentifikasi melalui perbandingan antarstudi. Kesenjangan-kesenjangan tersebut dirangkum secara sistematis pada tabel di bawah ini.

Tabel 1 *Research Gap*

No	Kesenjangan Penelitian	Dasar Temuan
1	Minimnya integrasi analisis teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan dalam satu kerangka penelitian tunggal	Studi cenderung fokus pada satu dimensi: teknis (Chen et al., 2025; Hashemian et al., 2026), ekonomi (Naseri et al., 2026; Tokac et al., 2025; Yu et al., 2024), lingkungan (Balboa-Espinoza et al., 2023; Brousek et al., 2026), atau keselamatan (Kahraman & Düzgün, 2026; Kuslap et al., 2025)
2	Kurangnya standar pelaporan bauran listrik lokal dalam penilaian dampak lingkungan EV tambang	Dampak lingkungan bervariasi tergantung bauran listrik namun tidak selalu dilaporkan konsisten (Balboa-Espinoza et al., 2023; Brousek et al., 2026; Tokac et al., 2025)
3	Terbatasnya kajian dampak infrastruktur jalan angkut akibat bobot baterai pada konteks tambang	Kajian <i>pavement</i> baru tersedia untuk truk perkotaan, belum untuk <i>haul road</i> tambang (Chen & Xue, 2025)
4	Studi keselamatan ventilasi BEV bawah tanah masih terbatas pada studi kasus tunggal per tambang	Studi mendalam baru tersedia untuk konteks tertentu seperti <i>Turquoise Ridge</i> (Kahraman & Düzgün, 2026)
5	Minimnya studi <i>techno-economic</i> elektrifikasi tambang pada konteks negara berkembang dengan bauran listrik fosil dominan	Studi Indonesia baru tersedia sebagai studi kasus tunggal (Adi & Prihastha, 2026), belum banyak pembangkit dari negara berkembang lain
6	Belum banyak kajian elektrifikasi pada alat gali-muat selain <i>haul truck</i>	Studi <i>electric shovel</i> masih relatif tunggal dibanding studi <i>haul truck</i> (Chen et al., 2025)

No	Kesenjangan Penelitian	Dasar Temuan
7	Kurangnya kerangka kuantitatif yang menghubungkan kebijakan dengan kelayakan finansial elektrifikasi tambang secara spesifik	Prioritas kebijakan dirumuskan pada level <i>trucking</i> umum (Dua & Almutairi, 2025), belum spesifik untuk sektor tambang

3.9. Future Research Opportunity

Kesenjangan penelitian pada Tabel-1 bukan sekadar catatan keterbatasan, melainkan petunjuk arah bagi penelitian selanjutnya. Sebagian arah tersebut merupakan kelanjutan langsung dari studi yang sudah ada, seperti replikasi metode pada konteks yang lebih beragam, sementara sebagian lain menuntut pendekatan baru yang belum banyak dicoba, seperti penggabungan indikator teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan ke dalam satu model penilaian kelayakan. Agenda penelitian pada Tabel-2 disusun mengikuti prinsip keterhubungan langsung dengan Tabel-1, sehingga setiap arah penelitian yang diusulkan memiliki justifikasi yang jelas dari kesenjangan yang hendak dijawabnya.

Tabel 2 *Future Research Opportunity*

No	Kesenjangan Penelitian	Dasar Temuan
1	Pengembangan kerangka analisis terintegrasi (teknis-ekonomi-lingkungan-keselamatan) khusus untuk elektrifikasi tambang	Menjawab fragmentasi topik pada Research Gap No. 1
2	Studi <i>life cycle assessment</i> EV tambang dengan skenario bauran listrik yang eksplisit dan bervariasi (termasuk skenario transisi energi terbarukan)	Melengkapi keterbatasan pelaporan bauran listrik pada studi LCA yang ada (Balboa-Espinoza et al., 2023; Brousek et al., 2026)
3	Kajian pengaruh bobot baterai terhadap umur <i>haul road</i> dan implikasinya pada biaya pemeliharaan jalan tambang	Adaptasi temuan <i>pavement</i> perkotaan ke konteks tambang (Chen & Xue, 2025)
4	Replikasi studi keselamatan ventilasi BEV pada berbagai tipologi tambang bawah tanah (kedalaman, geometri, sistem ventilasi berbeda)	Memperluas generalisasi temuan tunggal <i>Turquoise Ridge</i>
5	Studi <i>techno-economic</i> komparatif elektrifikasi tambang pada beberapa	Memperkuat konteks Indonesia yang masih tunggal (Adi & Prihastha, 2026)

No	Kesenjangan Penelitian	Dasar Temuan
	negara berkembang dengan karakteristik bauran listrik berbeda	2026) dengan pembanding regional
6	Perluasan kajian elektrifikasi ke peralatan tambang non-haul truck lain, seperti drill rig dan alat penunjang lainnya	Melanjutkan arah yang dirintis studi <i>electric shovel</i> (Chen et al., 2025)
7	Pengembangan model kuantitatif keterkaitan insentif kebijakan (subsidi, harga karbon, standar infrastruktur) dengan indikator kelayakan finansial (NPV/IRR) spesifik tambang	Menjembatani kebijakan makro (Dua & Almutairi, 2025) dengan kelayakan mikro tambang (Adi & Prihata, 2026; Yu et al., 2024)

4. Kesimpulan

Perkembangan penelitian mengenai elektrifikasi kendaraan di industri pertambangan berlangsung sangat pesat, namun belum diikuti oleh kematangan kerangka analisis yang memadai. Meningkatnya jumlah publikasi sejak tahun 2023 lebih mencerminkan besarnya perhatian terhadap upaya dekarbonisasi global daripada terbentuknya landasan ilmiah yang kuat. Kondisi ini menunjukkan bahwa bukti yang tersedia masih bersifat tersebar dan belum terintegrasi secara sistematis sehingga diperlukan kajian yang mampu menyusun dan mengevaluasi temuan-temuan tersebut secara menyeluruh.

Hingga saat ini belum terdapat teknologi baterai maupun metode pengisian daya yang dapat diterapkan secara universal pada seluruh kegiatan pertambangan. Pemilihan teknologi perlu disesuaikan dengan kondisi operasional, karakteristik tambang, serta kebutuhan produksi di masing-masing lokasi. Oleh karena itu, penerapan satu standar teknologi yang sama untuk semua jenis tambang berpotensi kurang tepat dan dapat menghambat implementasi elektrifikasi di lapangan.

Dibandingkan manfaat lingkungannya, dampak elektrifikasi terhadap efisiensi energi dan produktivitas telah ditunjukkan secara lebih konsisten. Sementara itu, manfaat lingkungan tidak dapat digeneralisasi karena sangat dipengaruhi oleh sumber listrik yang digunakan dalam proses pengisian daya kendaraan.

Implementasi kendaraan listrik di pertambangan tidak hanya bergantung pada kesiapan teknologi kendaraan, tetapi juga pada kesiapan sistem pendukungnya, seperti infrastruktur pengisian daya, sistem ventilasi, dan kondisi jalan angkut. Oleh karena itu,

keberhasilan penerapannya lebih ditentukan oleh perencanaan tambang yang terintegrasi daripada oleh spesifikasi kendaraan semata.

Arah penelitian selanjutnya perlu bergeser dari kajian yang hanya menilai kelayakan elektrifikasi secara terpisah menuju pendekatan yang lebih terpadu. Evaluasi sebaiknya mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan sebagai komponen yang saling berkaitan, terutama pada negara berkembang yang memiliki karakteristik sistem energi berbeda dengan negara maju.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta yang telah memberikan dukungan akademik dan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat bermanfaat selama proses penyusunan artikel. Penelitian ini tidak menerima dukungan pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, komersial, maupun organisasi nirlaba.

6. Referensi

- Li, X., Gu, Q., Wang, Q., Luo, J., Liu, D., & Chang, Y. (2024). Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 56, 101597. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101597>
- Davies, M. (2024). The role of strategic mine planning in decarbonising the mining industry. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(6), 2783–2785. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01083-2>
- Boa Morte, I. B., de Queiroz F. Araújo, O., Morgado, C. R. V., & de Medeiros, J. L. (2023). Electrification and decarbonization: A critical review of interconnected sectors, policies, and sustainable development goals. *Energy Storage and Saving*, 2(4), 615–630. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2023.08.004>
- Bao, H., Knights, P., Kizil, M., & Nehring, M. (2023). Electrification alternatives for open pit mine haulage. *Mining*, 3(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/mining3010001>
- Kuslap, E., Li, J., Talehatibieke, A., & Hitch, M. (2025). Battery electric vehicles in underground mining: Benefits, challenges, and safety considerations. *Energies*, 18(14), 3588. <https://doi.org/10.3390/en18143588>
- Mesa, J. A., Hincapie-Florez, D., Bobadilla-Vasquez, M., Corredor, L., Pupo-Roncallo, O., & Gonzalez-Quiroga, A. (2025). Assessing technological trends in mining fleet energy management toward sustainable mineral

- extraction. *Resources Policy*, 109, 105714. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105714>
- Balboa-Espinoza, V., Segura-Salazar, J., Hunt, C., Aitken, D., & Campos, L. (2023). Comparative life cycle assessment of battery-electric and diesel underground mining trucks. *Journal of Cleaner Production*, 425, 139056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139056>
- Tokac, B., Zhang, Q., & Sari, Y. A. (2025). Environmental and economic comparison of diesel and electric trucks in open-pit mining operations. *Journal of Cleaner Production*, 507, 145540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145540>
- Naseri, P., Di Lorenzo, M., & Buckley, C. E. (2026). Projected cost competitiveness of zero-emission trucks in Australia. *Research in Transportation Economics*, 117, 101756. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2026.101756>
- Hashemian, S. N., Assimi, H., Ranjbar, H., Pourmousavi, S. A., & Soong, W. L. (2026). Coordinated sizing of battery and charging systems for underground mining electric trucks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 175, 111652. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2026.111652>
- Baranauskas, M., Pippuri-Mäkeläinen, J., Rahkola, P., Farzam Far, M., & Pihlatie, M. (2025). Feasibility and benefits of off-highway mining trucks electrification for different mine profiles. *IEEE Access*, 13, 117024–117042. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3586728>
- Veza, I., Asy'ari, M. Z., Idris, M., Epin, V., Fattah, I. M. R., & Spraggon, M. (2023). Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV. *Alexandria Engineering Journal*, 82, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.020>
- Adi, T. W., & Prihastha, N. G. (2026). Feasibility analysis of PLN's mining electric vehicle implementation: A techno-economic study of South Kalimantan coal mining and national energy policy implications. *Journal of Authentic Research*, 5(1), 333–346. <https://doi.org/10.36312/z44wt186>
- Yu, G., Ye, X., Ye, Y., Huang, H., & Xia, X. (2024). Optimal decarbonisation pathway for mining truck fleets. *Journal of Automation and Intelligence*, 3(3), 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.jai.2024.03.003>
- Kahraman, M., & Düzgün, H. Ş. (2026). Safety implications of integrating battery-electric vehicles with ventilation-on-demand in underground mining: A simulation-driven study at Turquoise Ridge Mine. *Journal of Industrial Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2026.06.001>
- Halim, A., Anacki, W., Anufriev, S., Acuña-Duhart, E., & Le, J. (2026). Energy consumption ratio and heat output comparison of battery electric vehicles and diesel-powered machines: Results of field trials in European Union and Canadian underground mines. *CIM Journal*, 17(1), 48–61. <https://doi.org/10.1080/19236026.2025.2605904>
- Zhang, W., Yang, J., Zhang, W., & Ma, F. (2019). Research on regenerative braking of pure electric mining dump truck. *World Electric Vehicle Journal*, 10(2), 39. <https://doi.org/10.3390/wevj10020039>
- Shishkin, P. V., Malozyomov, B. V., Martyushev, N. V., Kondratiev, V. V., Dorofeev, E. M., Kononenko, R. V., & Vit'kina, G. Y. (2025). Optimization of energy balance and powertrain for electric mining dump trucks in coal mine reclamation operations. *World Electric Vehicle Journal*, 16(11), 601. <https://doi.org/10.3390/wevj16110601>
- Chen, Z., Lei, Z., Guan, W., & Wang, G. (2025). Research on multi-dimensional energy consumption evaluation method of mining electric shovel. *Results in Engineering*, 28, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108302>
- Ndlovu, S., & Adewuyi, S. O. (2025). Towards sustainable metal extraction: Navigating energy and water challenges in the South African mining industry. *The Extractive Industries and Society*, 24, 101760. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101760>
- Naumanen, M., Uusitalo, T., Huttunen-Saarivirta, E., & van der Have, R. (2019). Development strategies for heavy duty electric battery vehicles: Comparison between China, EU, Japan and USA. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104413>
- Brousek, J., Petr, T., & Brabec, P. (2026). Comparative analysis of CO₂ emissions from conventional internal combustion engine vehicles, battery electric vehicles, and fuel cell electric vehicles in selected Central European countries. *Journal of Cleaner Production*, 544, 147706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147706>
- Chen, Y., & Xue, J. (2025). Sustainable urban freight: Pavement, environmental, and economic impacts of heavy-duty electric trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 149, 105033. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105033>
- Foda, A., & Mohamed, M. (2026). Zero-emission medium- and heavy-duty fleet operation: The perspectives of stakeholders. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 150, 105127. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105127>
- Dua, R., & Almutairi, S. (2025). A perspective on emerging policy and economics research priorities for enabling low-carbon trucking. *Energy Research & Social Science*, 124, 104025. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104025>