

BAB II. Tinjauan Pustaka

II.1 Penelitian yang Relevan

Sub-bab ini membahas sejumlah penelitian terdahulu yang berkaitan dengan elektrifikasi sektor pertambangan, khususnya penerapan kendaraan listrik tambang dan pengelolaan infrastrukturnya. Kajian dilakukan untuk meninjau perkembangan analisis teknis, ekonomi, serta lingkungan dari berbagai studi global.

Sebagaimana tercantum pada Tabel II-1, sebagian besar penelitian berfokus pada efisiensi energi dan penurunan emisi, namun belum banyak yang menelaah peran penyedia listrik seperti PLN dalam mendukung elektrifikasi tambang. Oleh karena itu, penelitian ini menempati posisi baru dengan mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, dan strategis dari perspektif sistem kelistrikan nasional.

Tabel II-1 Penelitian Relevan

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Publikasi	Tahun	Gap Penelitian
1	Hooli, J., & Halim, A.	Battery Electric Vehicles in Underground Mines: Insights from Industry	Menunjukkan bahwa penerapan BEV di tambang bawah tanah mengurangi emisi langsung hingga 100%, menurunkan suhu ruang kerja 2–4°C, dan menekan kebutuhan energi ventilasi hingga 40%.	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2025	Fokus hanya pada tambang bawah tanah; belum menganalisis kesiapan infrastruktur kelistrikan dan keekonomian pada sistem tambang terbuka.
2	Tokac, B., Zhang,	Environmental and Economic Comparison of	Menunjukkan bahwa konversi dump truck	Journal of Cleaner Production	2025	Belum mengaitkan hasil temuan

	Q., & Sari, Y. A.	Diesel and Electric Trucks in Open-Pit Mining Operations	diesel ke listrik dapat menurunkan emisi CO ₂ sebesar 92,6% dan biaya operasi hingga 40–62%, dengan efisiensi motor listrik >90%.			dengan sistem penyediaan listrik nasional dan model bisnis utilitas.
3	Zhang, Q., & Sari, Y. A.	Assessing Technological Trends in Mining Fleet Energy Management Toward Sustainable Mineral Extraction	Mengidentifikasi tren elektrifikasi armada tambang dunia dan menekankan peran BEV dalam mengurangi 50 juta ton emisi CO ₂ global per tahun.	Elsevier – Resources Policy	2024	Tidak membahas aspek implementasi dan kesiapan sistem distribusi energi pada negara berkembang seperti Indonesia.
4	Wang, G., Miller, M. R., & Fulton, L.	The Infrastructure Cost for Depot Charging of Battery Electric Trucks	Menjelaskan bahwa biaya infrastruktur depot charging tergantung pada skala armada dan utilisasi harian; 50% peningkatan utilisasi dapat menurunkan biaya infrastruktur per	The Electricity Journal	2025	Belum meninjau aspek integrasi jaringan listrik industri atau kondisi kelistrikan nasional (utility grid).

			kendaraan hingga 50%.			
--	--	--	--------------------------	--	--	--

II.2 Landasan Teori

II.2.1 Perkembangan Global

Industri pertambangan global sedang bergerak menuju elektrifikasi alat-alat berat sebagai upaya dekarbonisasi dan efisiensi operasi. Kendaraan tambang konvensional (*haul truck*) berbahan bakar diesel diketahui menyumbang ~40–50% emisi CO₂ sektor pertambangan. Ghosh *et al* (2024)

Tekanan untuk menurunkan emisi ini mendorong produsen alat berat dan perusahaan tambang mengembangkan solusi elektrik. Tren saat ini menunjukkan peralihan dari tenaga diesel ke alternatif baterai listrik seiring kemajuan teknologi baterai, karena opsi elektrifikasi terbukti dapat menurunkan emisi gas rumah kaca dibanding truk diesel konvensional. Mesa *et al* (2025)

Dua produsen alat tambang terbesar dunia, Caterpillar dan Komatsu, telah menguji prototipe haul truck elektrik dengan target komersialisasi penuh sebelum 2030 sebagai respons atas permintaan pasar untuk operasi tambang yang lebih ramah lingkungan.

II.2.2 Studi Kasus Elektrifikasi Tambang Global

Dump truck tambang listrik umumnya dilengkapi paket baterai berkapasitas sangat besar (ratusan kWh hingga >1 MWh) dan motor traksi listrik bertenaga tinggi. Sebagai contoh, XCMG (produsen Tiongkok) mengeluarkan dump truck listrik model XDR80TE dengan baterai *lithium iron phosphate* (LFP) ~525 kWh dan motor listrik berdaya 500 kW (puncak 800 kW)

Kendaraan 110-ton (72 ton muatan) ini dirancang khusus untuk operasi open-pit mining, mampu mencapai kecepatan ~43 km/jam dengan tanjakan maksimal 30%

Teknologi pengisian dayanya menggunakan sistem fast charging (SPKLU) alih-alih *battery swapping*, mengingat fokusnya pada charging on-site. Standar konektor yang dipakai umumnya GB/T (standar Tiongkok) dengan daya pengisian ultra-cepat sekitar 480 kW per dispenser. Dengan charger 480 kW, baterai 500 kWh

dapat terisi ~80% dalam waktu sekitar 1 jam, sehingga cocok dengan jeda operasi (misal saat *shift change* atau *loading*) di site tambang. Karakteristik ini memenuhi tuntutan operasional tambang: nol emisi lokal, torsi tinggi sejak putaran nol, lebih sedikit komponen bergerak, dan kebisingan lebih rendah. Mesa *et al* (2025).

II.3 Kerangka Pemikiran

II.3.1 Teknologi EV untuk Dump Truck tambang.

Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) sebagaimana tercantum pada Gambar II-1, merupakan infrastruktur kelistrikan yang dirancang untuk menyalurkan energi listrik secara aman dan efisien ke kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (KBLBB). SPKLU berfungsi sebagai titik pengisian energi dengan sistem pengendali tegangan dan arus yang sesuai dengan spesifikasi baterai kendaraan, menggunakan teknologi pengisian arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC) dengan standar konektor tertentu seperti IEC 62196 atau GB/T.



Gambar II-1 SPKLU PT PLN Persero [40]

Secara teknis, SPKLU terdiri atas unit *charger*, sistem proteksi listrik, *metering device*, sistem komunikasi data, dan modul kontrol yang terintegrasi dengan jaringan listrik tegangan rendah hingga menengah milik penyedia tenaga listrik, seperti PT PLN (Persero).

II.3.2 Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU)

Menurut Peraturan Menteri ESDM Nomor 1 Tahun 2023, SPKLU dikategorikan berdasarkan kapasitas dayanya menjadi *slow charging* (≤ 7 kW),

medium charging (>7–22 kW), *fast charging* (>22–50 kW), dan *ultra-fast charging* (>50 kW). Pembangunan dan pengoperasian SPKLU ditujukan untuk mendukung percepatan ekosistem kendaraan listrik nasional serta diversifikasi penggunaan energi bersih di sektor transportasi.



Gambar II-2 Penyediaan SPKLU sesuai Permen ESDM No 1 tahun 2023 [6]

Dalam konteks industri, seperti pertambangan atau logistik berat, SPKLU berperan sebagai depot charging station dengan kapasitas besar (hingga 480 kW per unit), guna memenuhi kebutuhan pengisian truk listrik tambang atau kendaraan operasional berdaya tinggi yang beroperasi dalam siklus kerja kontinu.

II.3.3 Skema Bisnis SPKLU pada PT PLN (Persero)

Sebagai pelaksana utama penugasan pemerintah dalam penyediaan infrastruktur kendaraan listrik berbasis baterai, PT PLN (Persero) mengembangkan berbagai skema bisnis kemitraan SPKLU (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) yang bersifat fleksibel dan kolaboratif dengan melibatkan sektor swasta.



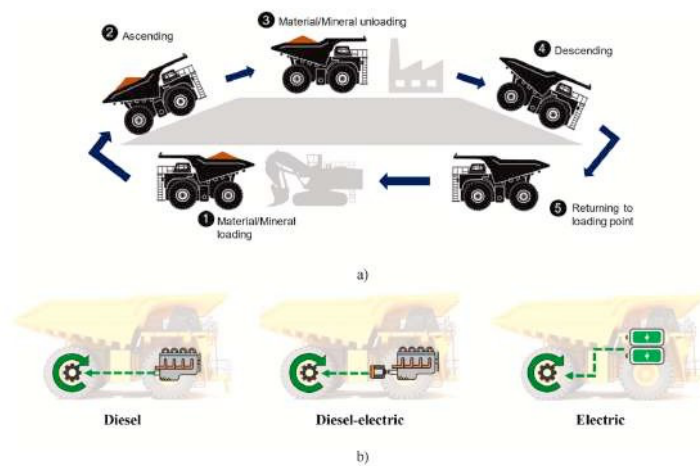
Gambar II-3 Skema Kemitraan SPKLU PT PLN (Persero) [41]

Skema kemitraan ini bertujuan mempercepat pembangunan infrastruktur pengisian daya secara nasional sekaligus memastikan keberlanjutan investasi melalui mekanisme pembagian pendapatan (*revenue sharing*) yang adil antara PLN dan mitra. Berdasarkan *Materi Tayang SPKLU Kemitraan PLN (Desember 2024)*, terdapat empat skema utama yang dapat ditawarkan, yaitu:

- Skema 1 (*Full PLN Ownership*)**,
- Skema 2 (*Partnership with Land Owner*)**,
- Skema 3 (*Partnership with Land and Charger Owner*)**, dan
- Skema 4 (*Independent Partner Operation*)**.

II.3.4 Infrastruktur Pendukung Untuk *Heavy Duty Vehicle*

Penelitian Hooli dan Halim (2025) menjelaskan bahwa sistem pengisian daya untuk kendaraan tambang bawah tanah telah berevolusi dari *slow charging* menuju *fast charging* berbasis arus searah (DC) dengan kapasitas 150–350 kW per unit, guna mendukung waktu pengisian antara 30–90 menit sesuai durasi jeda kerja alat. Selain aspek teknis, penerapan *smart charging management system* menjadi penting untuk menjaga kestabilan daya dan mengoptimalkan penggunaan energi selama periode non-puncak beban listrik di area tambang (Hooli & Halim, 2025).



Gambar II-4 Siklus Kendaraan Tambang [02]

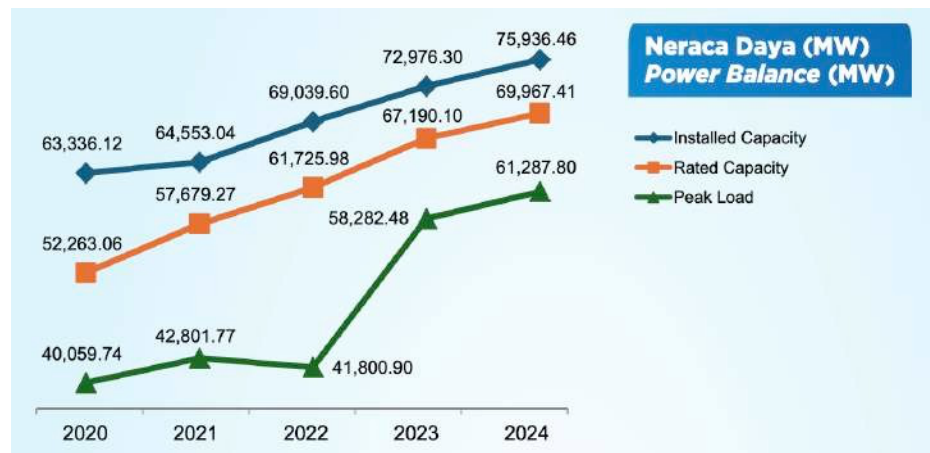
Studi Zhang *et al.* (2024) menegaskan bahwa keberhasilan elektrifikasi armada tambang sangat bergantung pada kemampuan sistem kelistrikan untuk menyediakan suplai energi dengan efisiensi tinggi dan *power quality* yang stabil. Untuk kendaraan *heavy-duty*, seperti truk tambang listrik, diperlukan integrasi antara jaringan tegangan menengah PLN dengan sistem distribusi internal tambang melalui gardu dan *depot charging station* berkapasitas 480 kW hingga 1 MW per titik. Sistem ini umumnya dilengkapi *converter*, *load balancing unit*, serta *energy management software* untuk meminimalkan kehilangan energi dan mengatur antrian pengisian daya secara otomatis berdasarkan prioritas kendaraan dan tingkat baterai.

Dalam konteks operasi tambang terbuka, Tokac *et al.* (2025) menambahkan bahwa penggunaan teknologi *fast charging* dan *trolley-assist hybrid* menjadi solusi yang paling feasible secara teknis dan ekonomis dibandingkan sistem *battery swapping*, karena lebih sesuai dengan siklus kerja truk tambang yang intensif dan kebutuhan mobilitas tinggi antar-rute (Tokac *et al.*, 2025).

II.3.5 Kesiapan sistem PLN (pembangkit, transmisi, distribusi)

Berdasarkan Statistik PLN Tahun 2024, serta tercantum pada Gambar II-5, PT PLN (Persero) telah menunjukkan kinerja signifikan dalam penyediaan infrastruktur ketenagalistrikan yang mencakup pembangkitan, transmisi, dan distribusi di seluruh Indonesia. Pada akhir tahun 2024, kapasitas terpasang nasional mencapai 75.936,46 MW, termasuk pembangkit milik PLN, sewa, dan *Independent*

Power Producer (IPP). Dari total tersebut, kapasitas pembangkit yang dimiliki PLN Group mencapai 46.833,23 MW yang tersebar pada 6.226 unit pembangkit, dengan porsi terbesar berada di sistem Jawa sebesar 32.763,18 MW (69,96%). Komposisi pembangkit didominasi oleh PLTU sebesar 21.026,90 MW (27,69%), diikuti PLTGU, PLTD, PLTMG, dan PLTA yang masing-masing berkontribusi terhadap bauran energi nasional.



Gambar II-5 Kemampuan Pembangkit PT PLN tahun 2024 [42]

Pada sektor transmisi, PLN telah mengoperasikan jaringan sepanjang 72.655,85 kilometer sirkuit (kms) yang terdiri atas saluran 500 kV sepanjang 7.718,06 kms, 275 kV sepanjang 4.640,45 kms, 150 kV sepanjang 54.043,47 kms, 70 kV sepanjang 6.152,93 kms, dan 25–30 kV sepanjang 100,95 kms. Peningkatan kapasitas ini memperkuat keandalan sistem transmisi antarpulau dan interkoneksi Jawa–Sumatera serta Kalimantan–Sulawesi yang tengah dikembangkan. Sementara itu, kapasitas terpasang trafo gardu induk pada tahun 2024 mencapai 182.786,94 MVA dari total 2.700 unit trafo, meningkat 1,45% dibanding tahun sebelumnya.

Untuk sistem distribusi, PLN mencatat total panjang jaringan sebesar 1.074.800,21 kms, terdiri atas Jaringan Tegangan Menengah (JTM) sepanjang 450.208,08 kms dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR) sepanjang 624.592,13 kms. Adapun kapasitas trafo gardu distribusi mencapai 68.978,99 MVA dengan jumlah 573.650 unit, meningkat 3,39% dibandingkan tahun sebelumnya. Melalui penguatan sistem pembangkit, transmisi, dan distribusi ini, PLN berhasil menjaga rasio elektrifikasi nasional pada tingkat 98,45% di akhir tahun 2024, yang menandai kesiapan infrastruktur kelistrikan nasional dalam mendukung pertumbuhan ekonomi serta inisiatif elektrifikasi sektor industri dan transportasi.

II.3.6 Metode Analisis Kelayakan Ekonomi (IRR, NPV, Payback period)

Analisis kelayakan ekonomi merupakan tahap penting dalam evaluasi proyek investasi untuk menentukan apakah suatu proyek layak dijalankan berdasarkan kriteria finansial. Metode yang umum digunakan meliputi *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PBP). Ketiga metode ini digunakan untuk mengukur efisiensi investasi dari berbagai perspektif, yaitu nilai kini arus kas bersih, tingkat pengembalian internal, dan periode pengembalian modal

Metode NPV menilai selisih antara nilai kini arus kas masuk dan keluar suatu proyek dengan mempertimbangkan faktor nilai waktu uang. NPV yang bernilai positif menunjukkan bahwa proyek memberikan keuntungan finansial yang melampaui biaya modalnya, sehingga layak untuk dilaksanakan. Kelebihan metode ini adalah kemampuannya mencerminkan likuiditas dan profitabilitas proyek secara menyeluruh serta mempertimbangkan risiko melalui pemilihan tingkat diskonto yang tepat. Namun, kelemahan NPV terletak pada sensitivitas terhadap estimasi arus kas dan tingkat diskonto yang digunakan, sehingga ketidakpastian pada dua faktor ini dapat mengubah hasil keputusan secara signifikan

Sementara itu, metode IRR menghitung tingkat diskonto di mana NPV sama dengan nol, sehingga mencerminkan tingkat pengembalian internal dari suatu investasi. IRR yang lebih tinggi dari *cost of capital* menandakan proyek layak untuk dijalankan. Keunggulan IRR adalah kemudahannya dalam membandingkan tingkat pengembalian antarproyek, terutama bagi pengambil keputusan non-keuangan. Namun, IRR memiliki keterbatasan apabila arus kas tidak konvensional (non annuity) karena dapat menghasilkan lebih dari satu nilai IRR dan menimbulkan interpretasi yang ambigu. Oleh karena itu, beberapa pengembangan seperti *Modified Internal Rate of Return* (MIRR) dan *Average Internal Rate of Return* (AIRR) telah diperkenalkan untuk mengatasi kelemahan tersebut

Metode *Payback Period* (PBP) digunakan untuk mengukur seberapa cepat investasi dapat kembali, dengan fokus pada likuiditas dan risiko jangka pendek. Walaupun metode ini sederhana dan mudah dipahami, PBP tidak mempertimbangkan nilai waktu uang dan keuntungan setelah periode

pengembalian, sehingga kurang akurat untuk evaluasi jangka panjang. Meskipun demikian, kombinasi antara NPV, IRR, dan PBP sering digunakan dalam penelitian maupun praktik industri untuk menghasilkan analisis kelayakan yang lebih komprehensif terhadap suatu proyek investasi

II.3.7 Implikasi Strategis

1. Hubungan elektrifikasi tambang dengan strategi bisnis PLN

Elektrifikasi sektor pertambangan melalui penggunaan kendaraan listrik tambang (*EV truck*) sejalan dengan strategi transformasi bisnis PT PLN (Persero) dalam memperluas pasar kelistrikan industri dan memperkuat peran sebagai green energy enabler. Berdasarkan studi Tokac *et al.* (2025), peralihan dari truk diesel ke truk listrik dapat menurunkan biaya operasional hingga 40–62% dan mengurangi emisi karbon hingga 92,6%. Bagi PLN, peningkatan kebutuhan daya di lokasi tambang menjadi peluang bisnis baru pada segmen pelanggan tegangan tinggi dengan potensi tambahan penjualan listrik mencapai puluhan gigawatt-hour per tahun. Penelitian Zhang dan Sari (2024) menegaskan bahwa elektrifikasi industri berat seperti pertambangan dapat menjadi pendorong pertumbuhan ekonomi sekaligus memperkuat posisi PLN dalam mendukung program transisi energi nasional.

2. Dampak terhadap bauran energi, carbon trading, dan CSR tambang

Penerapan kendaraan listrik di sektor pertambangan berimplikasi langsung terhadap peningkatan porsi energi bersih dalam bauran energi nasional. Dengan meningkatnya konsumsi listrik berbasis jaringan PLN yang sebagian berasal dari pembangkit energi terbarukan, intensitas emisi karbon sektor tambang dapat berkurang secara signifikan. Menurut Hooli dan Halim (2025), integrasi BEV tambang dengan sumber listrik hijau mampu menurunkan emisi karbon hingga 70% dibandingkan sistem diesel konvensional. Selain itu, pengurangan emisi tersebut membuka peluang perdagangan karbon (*carbon trading*) dan peningkatan kinerja *Environmental, Social, and Governance (ESG)* melalui program CSR. Bagi PLN, keterlibatan dalam proyek elektrifikasi tambang tidak hanya memberikan nilai ekonomi, tetapi juga memperkuat reputasi sebagai

perusahaan yang berperan aktif dalam dekarbonisasi dan keberlanjutan lingkungan.