JURNAL LOCUS: Penelitian & Pengabdian
Volume 5 No. 6 June 2026
E-ISSN 2829-7334| P-ISSN 2829-5439
Hompage: https://locus.rivierapublishing.id/index.php/jl

Analisis Tekno-Ekonomi dan Prospek Strategis Nikel dalam Rantai Pasok Baterai Kendaraan Listrik Global: Implikasi terhadap Transisi Energi dan Mobilitas Berkelanjutan

Franklyn Sam George Mansa*, Dedi Priadi
Universitas Indonesia
Email: samgeorgemansa@gmail.com*

Keywords:
nickel; electric vehicle; lithium-ion battery; techno-economic analysis; downstream industry

Abstract
The increasing demand for electric vehicles (EVs) globally has driven the increase in demand for nickel-based lithium-ion batteries. Indonesia as the world's largest owner of nickel reserves has a strategic opportunity to strengthen its position in the global electric vehicle battery supply chain through the development of a nickel-based downstream industry. This study aims to evaluate the techno-economic feasibility of nickel utilization in the electric vehicle battery industry and assess the prospects for the sustainability of the use of national nickel reserves. The research used the Techno-Economic Analysis (TEA) method based on the BatPaC simulation from Argonne National Laboratory with a descriptive-quantitative approach. The results show that nickel-based cathode materials are the largest cost component in the production of lithium-ion batteries. Simulations show that the increase in nickel and lithium raw material prices significantly affects the economics of the battery industry. This study concludes that the development of the nickel-based battery industry in Indonesia is strategically and economically feasible to support the national energy transition.

Kata Kunci:
nikel; kendaraan listrik; baterai lithium-ion; techno-economic analysis; hilirisasi

Abstrak
Peningkatan permintaan kendaraan listrik (Electric Vehicle/EV) secara global telah mendorong kenaikan kebutuhan terhadap baterai lithium-ion berbasis nikel. Indonesia sebagai pemilik cadangan nikel terbesar dunia memiliki peluang strategis untuk memperkuat posisi dalam rantai pasok baterai kendaraan listrik global melalui pengembangan industri hilirisasi berbasis nikel. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan tekno-ekonomi pemanfaatan nikel dalam industri baterai kendaraan listrik serta menilai prospek keberlanjutan pemanfaatan cadangan nikel nasional. Penelitian menggunakan metode Techno-Economic Analysis (TEA) berbasis simulasi BatPaC dari Argonne National Laboratory dengan pendekatan deskriptif-kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material katoda berbasis nikel merupakan komponen biaya terbesar dalam produksi baterai lithium-ion. Simulasi menunjukkan bahwa peningkatan harga bahan baku nikel dan lithium secara signifikan mempengaruhi keekonomian industri baterai. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengembangan industri baterai berbasis nikel di Indonesia layak secara strategis dan ekonomis untuk mendukung transisi energi nasional.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan kendaraan listrik di Indonesia terus mengalami kenaikan hingga kini di tahun 2025. Upaya elektrifikasi dan pengurangan emisi karbon oleh pemerintah melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang tercantum dalam dokumen Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional untuk mencapai Net Zero Emission (NZE) pada

tahun 2060 menjadi dorongan kuat bagi transisi kendaraan bermotor dari bahan bakar fosil ke kendaraan bermotor listrik. Dengan meningkatnya populasi kendaraan listrik yang ada menjadikan kebutuhan bahan baku fabrikasi dan produksi meningkat (Energi et al., n.d.). Salah satu komponen yang menjadi continuous supply adalah baterai. Komponen ini dalam kendaraan listrik menyumbang hingga 40% dari total biaya produksi kendaraan listrik (Electric Vehicle Powertrain Market, 2025). Ada beberapa jenis baterai yang digunakan pada kendaraan listrik. Jenis baterai yang paling populer digunakan yaitu Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) dan Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA). Baterai jenis ini menggunakan nikel sebagai bahan baku utama dalam produksi baterai. Baterai jenis lain yang sering digunakan yaitu baterai berbasis Lithium Iron Phosphate (LFP). Pertimbangan penggunaan baterai berbasis nikel adalah densitas energi yang lebih tinggi dan siklus yang lebih panjang. Teknologi baterai lithium-ion berkembang pesat dengan laju tahunan melebihi 30% (Gianvincenzi et al., 2025).

Dari sisi industri, permintaan nikel berkualitas tinggi (Nikel kelas 1) yang digunakan dalam baterai EV telah menjadi faktor paling dasar yang menopang harga nikel pada level tinggi sejak 2021/2022 dan memberikan prospek menjanjikan di masa depan (Ahmed et al., 2026). Namun, dinamika pasar sepanjang rantai pasok teknologi energi akan memainkan peran besar dalam perubahan tingkat kritisitas sebuah material. Dalam studi penilaian material kritis yang dilakukan oleh U.S. Department of Energy, pada tahun 2035 mendatang lebih dari setengah jumlah permintaan nikel diperkirakan akan berasal dari baterai kendaraan listrik (EV). Nikel dikategorikan sebagai material kritis, sebagaimana ditetapkan dalam Keputusan Menteri ESDM No. 296.K/MB.01/MEM.B/2023 tentang penetapan jenis komoditas yang tergolong dalam klasifikasi mineral kritis (Energy, 2023).

Dengan jumlah cadangan yang besar, Indonesia berpotensi besar untuk meningkatkan nilai tambah nikel pada Energy Critical Mineral Value Chain atau Rantai Nilai Mineral Kritis Energi. Peningkatan nilai tambah atas mineral akan meningkatkan pendapatan ekspor, menciptakan lapangan kerja, dan mendorong pengembangan sektor-sektor lain (Scrufield et al., 2024). Indonesia telah memposisikan dirinya sebagai pemasok material penting bagi dua sektor yang pertumbuhannya paling cepat di dunia: kendaraan listrik dan energi bersih. Hal ini menegaskan bahwa nikel Indonesia kini bukan hanya komoditas mentah, melainkan bagian integral dari masa depan transisi energi global. Rantai nilai pemanfaatan nikel untuk mendukung industri kendaraan listrik perlu dikembangkan dan dalam hal tersebut membutuhkan analisis mendalam dari sisi teknologi (jenis baterai, kapasitas, kinerja) dan ekonomi (biaya produksi, harga nikel, prospek keuntungan, eksplorasi serta tren permintaan baterai).

Popularitas penggunaan baterai pada kendaraan listrik (EV) dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional untuk menggerakkan kendaraan didasarkan pada keunggulan efisiensi bahan bakar yang dimilikinya. Akibat densitas energi yang tinggi, desain baterai EV menjadi lebih padat dan ringan. Selain itu, mereka juga memiliki tegangan dan kapasitas spesifik yang lebih baik sehingga memungkinkan mengemudi dengan jarak yang lebih jauh dengan hanya satu kali pengisian daya (Koech et al., 2024). Secara umum ada beberapa tipe baterai yang digunakan pada kendaraan listrik, diantaranya Lithium-ion (Li-ion), Lead-Acid, Nickel-Cadmium, Nickel-Metal Hydride (Ni-MH), Zinc-Bromine, Sodium Chloride dan Nickel, Sodium Sulfur, Lithium-ion Polymer, Solid-State, dll (Amer et al., 2024).

Istilah baterai merujuk pada kumpulan unit elektrokimia dasar (sel/cell) yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Mezei, 2011). Sebuah sel baterai memiliki beberapa komponen dasar seperti anoda (Anode), katoda (Cathode), elektrolit dan pemisah. Setelah sebuah sel selesai dirakit, sel-sel ini kemudian dihubungkan secara seri/paralel membentuk sebuah modul. Sebuah modul biasanya terdiri atas 4 sampai 444 sel. Modul yang telah dikemas dan dilengkapi penghubung listrik (terminal), kemudian akan dirakit lagi dengan modul lainnya membentuk sebuah paket baterai dengan sebuah penghubung listrik (terminal) untuk menyediakan tegangan dan arus operasi yang diperlukan (Horowitz & Coffin, 2021). Prinsip operasi utama yang mendasari kinerja sebuah baterai isi ulang (sekunder) adalah interkalasi, yaitu proses ion lithium (Li+) bergerak masuk dan keluar dari struktur kristal padat material elektroda dalam proses pengisian (charge) atau pengosongan (discharge) baterai tanpa mengubah struktur tersebut secara signifikan (Mass et al., 2017).

Baterai Li-ion tidak dikategorikan sebagai baterai nickel-based (berbasis nikel), namun nikel adalah komponen kunci dalam banyak jenis baterai Li-ion modern yang digunakan pada kendaraan listrik (EV) dan perangkat berkinerja tinggi. Bahan katoda seperti Nickel-Cobalt-Aluminium Oxide (NCA) dan Nickel-Manganese-Cobalt Oxide (NMC) merupakan jenis bahan utama yang digunakan dalam baterai otomotif dan secara dominan dipakai pada baterai Li-ion. Bahan-bahan tersebut dipilih karena memiliki kepadatan energi yang tinggi secara volumetric (2900–3800 Wh/L) dan secara gravimetrik (590 hingga 740 Wh/kg vs. Li/Li+) dan kinerja stabil (ribuan siklus), di mana katoda-katoda ini biasanya dipasangkan dengan anoda grafit untuk membentuk sel Li-ion lengkap (Kubal et al., 2022).

Bijih nikel laterit dan nikel sulfida secara umum merupakan sumber dari produksi nikel. Bijih sulfida terdapat di lapisan bawah tanah yang lebih dalam daripada laterit. Setelah bijih tersebut ditambang, ia akan melalui proses pengolahan (beneficiation) untuk mengekstrak konsentrat nikel dari bijih sulfida (Ali et al., 2023). Berbeda dengan bijih sulfida, bijih nikel laterit diproses menggunakan metode yang berlainan. Bijih saprolit dicirikan oleh kandungan magnesium tinggi dan konsentrasi nikel yang relatif lebih tinggi, umumnya berkisar antara 1,5 hingga 3% Ni, sedangkan bijih limonit ditandai dengan kandungan besi tinggi dan konsentrasi nikel yang lebih rendah, yaitu sekitar 1 hingga 1,5% Ni (Asadrokht & Zakeri, 2022). Ada tiga jenis produk nikel: Kelas I (>99,8% Ni, termasuk NiSO4 dan MHP), Kelas II (<99,8% Ni, termasuk Ferro Nikel/FeNi dan Nickel Pig Iron/NPI), dan Nikel Sulfat. Nikel Kelas II tidak cocok untuk pembuatan baterai, berbeda dengan nikel Kelas I dan senyawa nikel (Ali et al., 2023).

Menurut data yang dikeluarkan oleh U.S. Geological Survey (USGS) - Mineral Commodity Summaries (MCS) 2025, Indonesia secara konsisten ditempatkan pada posisi teratas sebagai pemilik cadangan nikel terbesar di dunia. Secara spesifik, data USGS mencatat ada sekitar 55 juta metrik ton (MT) cadangan logam nikel (contained nickel) Indonesia dari total cadangan dunia sebesar 130 juta MT. Cadangan Indonesia diyakini menyumbang lebih dari 40% dari cadangan nikel global (Survey, 2025). Industri baja tahan karat yang memproduksi hot rolled coil (HRC) dan cold rolled coil (CRC) memiliki potensi untuk menghasilkan tambahan sebesar 9,5 kali dari bijih nikel mentah dengan permintaan sebesar $365 juta pada tahun 2045, sementara industri baterai kendaraan listrik memiliki potensi untuk menghasilkan tambahan sebesar 67 kali dengan permintaan sebesar $5,91 triliun pada tahun 2045 (Kementerian PPN/Bappenas, 2025).

Dengan menggunakan bantuan SCISPACE telah dilakukan analisa terhadap 258 peer-reviewed papers dalam 5 tahun terakhir (2020-2025) dan menghasilkan beberapa topik yang telah dibahas, diantaranya: Material Science – High-Ni cathodes (NMC 811, NCA, NCMA) yang memberikan peningkatan densitas energi sebesar 20-35%; Cost Analysis – Sel NMC 811 dengan harga sekitar $94,5 per kWh, di mana bahan katoda mendominasi 40% dari biaya; Indonesian Supply Chain – 48% dari produksi nikel global, dengan proses hilirisasi yang cepat dari bijih menjadi bahan baku baterai; dan Performance Trade-offs – hubungan yang terdefinisi dengan baik antara umur pakai, keamanan, dan biaya.

Berdasarkan topik-topik tersebut didapatkan beberapa critical research gaps, diantaranya sedikit penelitian yang menyediakan data biaya dan input energi yang terharmonisasi dan tersedia secara publik pada tingkat proses di seluruh sintesis CAM, perakitan sel, dan daur ulang (Gutsch & Leker, 2024). Indonesia adalah raksasa nikel, namun data ilmiah yang mendetail dan terpercaya mengenai proses produksinya masih sangat langka, sehingga dunia sulit menilai secara jujur seberapa murah dan seberapa ramah lingkungan nikel yang berasal dari Indonesia (Pereyra et al., 2024; Kiemel et al., 2021). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Börner, 2024) hanya ada 21 publikasi dari total 633 publikasi yang teridentifikasi mencakup perhitungan sendiri biaya baterai. State-of-the-art penelitian ini adalah dengan menggabungkan hasil analisis tekno-ekonomi nikel dalam rantai pasok baterai listrik dengan data cadangan nikel nasional serta mempertimbangkan dampak lingkungan sebagai sebuah variabel bebas.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis tren pasar nikel sebagai bahan baku baterai EV; (2) mengidentifikasi jenis baterai berbasis nikel (NMC, NCA) yang digunakan pada mobil listrik serta menghitung rata-rata kapasitas baterai EV; (3) melakukan analisis tekno-ekonomi terkait biaya produksi, harga jual, dan margin keuntungan dari pemanfaatan nikel; dan (4) memberikan indikasi arah kebijakan (policy-relevant insights) strategi pemanfaatan nikel untuk mendukung transisi energi kendaraan listrik di Indonesia. Manfaat penelitian ini adalah menyediakan kerangka analisis tekno-ekonomi yang terintegrasi antara data teknis produksi baterai (melalui simulasi BatPaC) dengan data cadangan nikel nasional, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kelayakan ekonomi dan keberlanjutan cadangan nikel Indonesia dalam mendukung industri baterai kendaraan listrik. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pembuat kebijakan di Kementerian ESDM, Kementerian Perindustrian, serta pelaku industri dalam merumuskan strategi hilirisasi nikel yang tepat sasaran, tidak hanya berfokus pada peningkatan volume produksi tetapi juga pada pengembangan rantai nilai tahap lanjut (prekursor, CAM, sel baterai) yang memberikan nilai tambah ekonomi tertinggi. Selain itu, penelitian ini juga berkontribusi pada pengayaan literatur ilmiah nasional mengenai analisis mineral kritis dan transisi energi, yang masih sangat terbatas, khususnya yang mengkombinasikan aspek tekno-ekonomi dengan proyeksi keberlanjutan cadangan sumber daya alam.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dengan metode *Techno-Economic Analysis* (TEA) untuk menilai kelayakan teknis dan ekonomi pemanfaatan nikel sebagai bahan baku baterai kendaraan listrik. Data-data yang digunakan merupakan data-data sekunder dari hasil tinjauan literatur. Techno-Economic Analysis (TEA) berbasis simulasi

dapat memberikan gambaran kelayakan komersial dan profitabilitas suatu teknologi atau proses, menjawab pertanyaan seperti 'Apakah teknologi ini layak secara ekonomi untuk dikembangkan?' (Barahmand & Eikeland, 2022). Program yang dipakai untuk melakukan analisis tekno-ekonomi produksi baterai adalah BatPaC: Battery Manufacturing Cost Estimation dari Argonne National Laboratory. Tool ini berbasis Microsoft Excel yang dimanfaatkan oleh peneliti, pembuat kebijakan dan industri untuk melihat bagaimana sifat material, desain sel/pack, dan biaya manufaktur saling terhubung (Argonne National Laboratory, 2022).

BatPaC menggunakan pendekatan bottom-up yang sangat rinci. Menggabungkan hasil analisis tekno-ekonomi nikel dalam rantai pasok baterai listrik dengan data cadangan nikel nasional akan menghasilkan kerangka analisis yang lebih strategis dan komprehensif. Selanjutnya, berdasarkan hasil TEA yang diperoleh, dapat mengagregasi data tersebut dengan jumlah penggunaan mobil listrik di Indonesia dalam kurun waktu tertentu untuk menghasilkan laju konsumsi atau permintaan nikel. Instrumen yang digunakan untuk memperkirakan berapa lama sumber daya alam dapat tetap produktif adalah reserves-to-production ratio (RPR atau R/P). Formula yang digunakan adalah E = Rt/Pt (Wienda et al., 2018), di mana Rt adalah cadangan (Reserves) pada waktu (t), Pt adalah produksi (Production) pada waktu (t), dan E merupakan hasil R/P Ratio.

Tabel 1. Sumber Data Analisis

Jenis Data	**Sumber**
Harga nikel	London Metal Exchange (LME), USGS
Kapasitas baterai EV	EV Database, BloombergNEF
Produksi nikel Indonesia	Kementerian ESDM, BPS
Biaya produksi baterai	IEA, CATL, Tesla Supplier Reports
Data ekspor nikel	Badan Pusat Statistik (BPS)

Sumber: Diolah penulis untuk keperluan penelitian, 2026

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji pengaruh fluktuasi harga nikel dan biaya energi listrik dalam proses produksi baterai terhadap hasil kelayakan ekonomi proyek, sehingga dapat diketahui tingkat ketahanan hasil analisis terhadap perubahan parameter utama. Output penelitian ini berupa model techno-economic analysis yang menggambarkan pemanfaatan nikel dalam produksi baterai kendaraan listrik, serta indikasi arah kebijakan (policy-relevant insights) yang bersifat informatif sebagai bahan pertimbangan bagi pengambil keputusan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Estimasi Konsumsi Nikel EV Global

Transformasi industri kendaraan listrik global menjadi faktor utama meningkatnya permintaan baterai lithium-ion. Menurut laporan Global EV Outlook 2025 dari International Energy Agency (IEA), permintaan baterai kendaraan listrik global telah mencapai lebih dari 1 TWh pada tahun 2024 dan diproyeksikan meningkat lebih dari tiga kali lipat menjadi sekitar 3 TWh pada tahun 2030 (Energy Agency, 2025). Estimasi konsumsi nikel untuk industri kendaraan listrik dihitung berdasarkan deployment baterai EV global menurut IEA Global EV Outlook 2026, dikalikan dengan pangsa baterai berbasis nikel (NMC/NCA), kemudian dikalikan dengan intensitas penggunaan nikel rata-rata sebesar 0.8 kg/kWh.

Berdasarkan laporan IEA Global EV Outlook 2026, deployment baterai EV global tahun 2025 adalah sebesar 1.2 TWh. IEA 2026 menyebut pangsa baterai LFP ≈ 55%, sehingga besaran pangsa baterai berbasis nikel (NMC + NCA) ≈ 45%, atau setara 540 GWh = 540.000.000 kWh. Dengan intensitas nikel 0.8 kg/kWh, maka estimasi konsumsi nikel global untuk baterai EV tahun 2025 sekitar ±432 kt Ni. China menguasai 60% deployment baterai global, sehingga konsumsi China ≈ 259 kt Ni, sedangkan Eropa dan Amerika masing-masing sebesar ≈ 65 kt Ni (I.E.A. International & Agency, 2026).

Tabel 2. Estimasi Konsumsi Nikel EV per Wilayah Tahun 2025

Wilayah/Negara	Pangsa Deployment (%)	Konsumsi Nikel (kt Ni)	Keterangan
China	60%	259,2	Dominasi pasar EV global
Eropa	15%	64,8	EV premium high-nickel
Amerika Utara	15%	64,8	SUV dan kendaraan performa
Lainnya	10%	43,2	Pasar berkembang
Total Global	**100%**	**432,0**	**Estimasi total 2025**

Sumber: Hasil olahan data dari IEA Global EV Outlook 2026, 2026

Dominasi dan Karakteristik Baterai Berbasis Nikel dalam Industri EV Global

Secara umum, baterai lithium-ion pada kendaraan listrik terdiri dari beberapa jenis kimia katoda, di antaranya NMC (Nickel Manganese Cobalt), NCA (Nickel Cobalt Aluminum), LFP (Lithium Iron Phosphate), LMO (Lithium Manganese Oxide) dan LCO (Lithium Cobalt Oxide). Baterai NMC banyak digunakan oleh produsen kendaraan listrik seperti Hyundai, BMW, Mercedes-Benz, Volkswagen, Wuling, sebagian produk BYD dan Kia. Keunggulan utama baterai NMC adalah densitas energi tinggi, performa kendaraan yang lebih baik, cocok untuk kendaraan jarak jauh, dan stabilitas siklus pengisian yang cukup baik. Jenis baterai NCA secara dominan digunakan oleh Tesla pada beberapa produknya, khususnya Model S dan Model X, dengan kandungan nikel yang dapat mencapai lebih dari 80% dari komposisi katoda (I.E.A. International & Agency, 2026).

Tabel 3. Pangsa Baterai EV Global dan Karakteristik Teknis (2025)

Jenis Baterai	Pangsa Pasar (%)	Kandungan Nikel	Segmen Kendaraan Utama
LFP	>55%	Tidak ada	Mass-market EV, terutama China
NMC	~35%	60–80%	SUV EV, sedan premium, kendaraan jarak jauh
NCA	~8%	>80%	Kendaraan Tesla performanya tinggi
Lainnya	~2%	Bervariasi	Aplikasi khusus

Sumber: Diolah dari IEA Global EV Outlook 2026 dan laporan BloombergNEF 2025, 2026

Kapasitas baterai kendaraan listrik umumnya diukur dalam satuan kilowatt-jam (kWh). Berdasarkan laporan Global EV Outlook 2026 dari IEA, rata-rata kapasitas baterai kendaraan listrik murni (Battery Electric Vehicle/BEV) pada tahun 2025 berada pada kisaran sekitar 60

kWh di China, sekitar 70 kWh di Eropa dan sekitar 90 kWh di Amerika Serikat (I.E.A. International & Agency, 2026). Sementara itu, berbagai laporan industri menunjukkan bahwa rata-rata global kapasitas baterai kendaraan listrik saat ini berada pada kisaran 63–65 kWh untuk kendaraan BEV (Energy Agency, 2025).

Tabel 4. Klasifikasi Kapasitas Baterai EV Berdasarkan Kategori Kendaraan

Kategori Kendaraan	Kapasitas Baterai (kWh)	Jangkauan Tipikal (km)	Jenis Baterai Utama
City car / Mini EV	20–40	150–250	LFP
Sedan / Hatchback	50–70	300–450	LFP / NMC
SUV / Crossover	70–100	400–600	NMC / NCA
Premium / Performance	>100	>600	NMC 811 / NCA

Sumber: Diolah dari EV Database dan Global EV Outlook 2026, 2026

Analisis Tekno-Ekonomi Pemanfaatan Nikel dalam Rantai Pasok Baterai Parameter Simulasi BatPaC

Data dalam simulasi perhitungan ini dikumpulkan dari berbagai sumber sekunder yang kredibel dan bereputasi secara internasional, seperti International Energy Agency, BloombergNEF, dan S&P Global. Data harga nikel mengacu pada harga global yang dimuat di London Metal Exchange (LME), yaitu sekitar US$17.195/MT (London Metal Exchange, 2026). Biaya rata-rata baterai diperoleh dari laporan tahunan BloombergNEF yang menunjukkan bahwa harga baterai lithium-ion global telah mencapai kisaran USD 99–108/kWh pada tahun 2025 (BloombergNEF, 2025). Untuk komposisi NMC 811, kontribusi nikel mencapai sekitar 80%, mangan 10%, dan kobalt 10%, sehingga harga nikel menjadi faktor dominan dalam pembentukan biaya prekursor.

Tabel 5. Estimasi Biaya Bahan Baku Prekursor NMC 811

Material	Komposisi NMC 811 (%)	Harga (USD/kg)	Kontribusi Biaya (USD/kg)
Nikel (Ni)	80%	17,20	13,76
Kobalt (Co)	10%	56,30	5,63
Mangan (Mn)	10%	1,20	0,12
Total Biaya Bahan Baku	**-**	**-**	**19,51**
Biaya Proses (+10–15%)	-	-	2,93
Total Biaya Prekursor	**-**	**-**	**22,44**

Sumber: Hasil perhitungan berdasarkan data LME (2026) dan studi literatur, 2026

Tabel 6. Parameter Simulasi BatPaC untuk Baterai NMC 811

Parameter	Nilai	Satuan / Keterangan
Kapasitas Energi	60	kWh (Kendaraan kelas menengah)
Kimia Katoda	NMC 811-G	Nikel 80%, Mangan 10%, Kobalt 10%
Volume Produksi	100.000	unit/tahun (kapasitas 6 GWh)
Harga Nikel (LME)	17.195	USD/MT
Direct Labor Rate	1,7	USD/jam (termasuk wages + benefits)
Tarif Listrik Industri	0,06–0,07	USD/kWh
Biaya Prekursor NMC 811	22,44	USD/kg
Harga CAM Total	28,11	USD/kg (termasuk lithium, proses, margin)

Sumber: Disusun untuk keperluan simulasi berdasarkan data sekunder, 2026

Hasil Analisis Tekno-Ekonomi

Langkah pertama dalam pemodelan ini adalah mengonfigurasi aplikasi BatPaC dengan parameter input yang telah divalidasi, sehingga simulasi dapat menghasilkan output berupa Pack Cost $/kWh (Useable) yang representatif untuk kondisi industri di Indonesia. Pada simulasi BatPaC, istilah Pack cost, $/kWh (usable) merupakan biaya keseluruhan unit baterai siap pasang ke kendaraan, yang komponennya meliputi: sel dan modul, BMS (Battery Management System), sistem manajemen termal (pendingin), housing atau casing luar, serta sistem pemutus arus keamanan (manual service disconnect). Berdasarkan hasil simulasi, total biaya produksi baterai berkisar antara USD 119–137/kWh. Nilai ini berada dalam rentang biaya global baterai lithium-ion saat ini (USD 100–150/kWh), sehingga hasil simulasi dapat dianggap realistis dan valid.

Tabel 7. Hasil Analisis Data BatPaC - Konfigurasi Baterai NMC 811

Parameter Output	Nilai	Satuan
Kapasitas Energi	60	kWh
Daya Sistem	150	kW
Cell Specific Energy	325	Wh/kg
Pack Specific Energy	151	Wh/kg
Berat Baterai	397,6	kg
Kandungan Nikel per Pack	36,45	kg/pack (0,61 kg/kWh)
Pack Cost (Minimum)	119	USD/kWh
Pack Cost (Maximum)	137	USD/kWh
Kapasitas Fasilitas Produksi	6	GWh (100.000 pack/tahun)

Sumber: Hasil simulasi BatPaC (Argonne National Laboratory), 2026

Struktur biaya baterai menunjukkan bahwa total biaya material menyumbang sekitar 49% dari harga total baterai. Hal ini berarti harga baterai sangat sensitif terhadap perubahan harga bahan baku. Dalam baterai NMC811, komponen yang paling mahal adalah nikel, litium,

dan material katoda. Komponen terbesar kedua adalah purchased items yang mencakup modul baterai, casing, cooling system, sensor, konektor, dan komponen elektronik pendukung, yaitu sekitar 25%. Depresiasi menyumbang sekitar 9% dari total biaya, yang menunjukkan bahwa industri baterai merupakan industri yang sangat padat modal (capital-intensive). Komponen lainnya termasuk BMS (6%), variable overhead (3%), energy cost (2%), general & administration (3%), R&D (2%), direct labor (<1%), financing cost, unit profit, dan warranty. Nilai persentase energy cost yang hanya sekitar 2% menunjukkan bahwa harga listrik bukan faktor utama yang menentukan harga baterai; sebaliknya, biaya material jauh lebih dominan.

Tabel 8. Struktur Komponen Biaya Baterai NMC 811 dari Simulasi BatPaC

Komponen Biaya	**Persentase (%)**	**Keterangan**
Total Biaya Material	49%	Nikel, lithium, katoda (komponen terbesar)
Purchased Items	25%	Modul, casing, cooling system, sensor
Depresiasi	9%	Investasi fasilitas dan mesin produksi
BMS (Battery Management System)	6%	Komponen kritis keselamatan baterai
Variable Overhead	3%	Utilitas, bahan habis pakai, perawatan
General, Sales & Administration	3%	Administrasi, manajemen, pemasaran
Energy Cost	2%	Listrik industri, energi proses produksi
R&D	2%	Pengembangan teknologi dan material baterai
Direct Labor	<1%	Industri baterai sangat terotomatisasi
Lainnya (Financing, Profit, Warranty)	~1%	Biaya pembiayaan, margin, dan garansi

Sumber: Hasil simulasi BatPaC dan olahan penulis, 2026

Analisis Reserve-to-Production (R/P) Ratio

Analisis Reserve-to-Production (R/P) ratio digunakan untuk mengevaluasi tingkat keberlanjutan sumber daya nikel dalam menghadapi peningkatan permintaan akibat pertumbuhan kendaraan listrik. Secara matematis, R/P ratio didefinisikan sebagai perbandingan antara cadangan yang tersedia terhadap tingkat produksi tahunan, yang merepresentasikan estimasi umur cadangan jika tingkat produksi tetap konstan (Tilton, 2003; Northey et al., 2017). Data penjualan kendaraan listrik di Indonesia dipilih sebagai dasar perhitungan karena jumlah produksi kendaraan listrik dalam negeri saat ini masih terbatas. Kementerian ESDM memproyeksikan populasi kendaraan listrik kumulatif di Indonesia mencapai sekitar 943.000 unit pada tahun 2030 (Nirmala Maulana Achmad, 2025). Dari tahun 2024 ke 2025, data riil menunjukkan penjualan melesat hingga 103.931 unit (tumbuh sekitar 140%). Dengan mengasumsikan pertumbuhan moderat sebesar 40% per tahun, konsumsi nikel per tahun dapat dihitung dari perkalian penjualan EV dan kebutuhan nikel per pack baterai.

Berdasarkan data hasil simulasi BatPac, kandungan nikel dalam jenis baterai NMC 811 untuk kendaraan listrik berukuran 60 kWh adalah 36,45 kg/pack atau setara 0,61 kg/kWh. Dengan demikian, konsumsi nikel pada tahun 2025 sebesar: 103.931 pack/yr × 36,45 kg/pack

= 3.788 ton/tahun. Data cadangan nikel yang dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik (BPS) dikategorikan sebagai Proved Reserves (Cadangan Terbukti) (BPS-Statistics Indonesia, 2026).

Tabel 9. Proyeksi Penjualan EV, Permintaan Baterai, dan Konsumsi Nikel di Indonesia (2021–2030)

Tahun	Penjualan EV (unit)	Konsumsi Nikel (ton/tahun)	Cadangan (juta ton)	R/P Ratio (tahun)
2021	687	25,0	57	2.280,73
2022	10.327	376,4	55,3	146,82
2023	17.147	625,0	55,0	87,99
2024	43.257	1.574,7	62,0	39,37
2025	103.931	3.788,2	62,0	16,37
2026*	145.503	5.303,5	62,0	11,69
2027*	203.704	7.424,9	62,0	8,35
2028*	285.186	10.394,9	62,0	5,97
2029*	399.260	14.552,9	62,0	4,26
2030*	558.964	20.374,0	62,0	3,04

*) Proyeksi dengan asumsi pertumbuhan 40% per tahun

Sumber: Hasil perhitungan berdasarkan data BPS, Kementerian ESDM, dan simulasi BatPaC, 2026

Dari Tabel 10, konsumsi nikel meningkat sangat signifikan dari sekitar 25 ton per tahun pada tahun 2021 menjadi lebih dari 20.374 ton per tahun pada tahun 2030. Pada periode yang sama, cadangan nikel diasumsikan relatif tetap pada kisaran 55–62 juta ton sehingga menyebabkan nilai R/P Ratio mengalami penurunan yang sangat tajam, dari 2.280,73 pada tahun 2021 menjadi 3,04 pada tahun 2030. Kondisi ini menunjukkan bahwa pertumbuhan konsumsi nikel berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan pertumbuhan cadangan yang tersedia. Secara teoritis, penurunan R/P Ratio merupakan konsekuensi dari meningkatnya permintaan bahan baku nikel yang digunakan dalam industri baterai kendaraan listrik. Meskipun demikian, hasil perhitungan R/P Ratio pada penelitian ini tidak dapat diartikan bahwa cadangan nikel Indonesia akan habis pada tahun 2030 karena cadangan nasional bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh kegiatan eksplorasi, penemuan cadangan baru, perubahan teknologi penambangan, serta peningkatan nilai keekonomian sumber daya (Energy Information Administration, 2024).

Indikasi Arah Kebijakan (Policy-Relevant Insights) Pemanfaatan Nikel Nasional

Hasil sensitivitas menunjukkan bahwa strategi pembangunan industri nikel Indonesia tidak dapat hanya berfokus pada peningkatan volume produksi tambang. Hasil simulasi BatPaC menunjukkan bahwa material katoda menyumbang sekitar 40–50% biaya produksi baterai NMC. Dengan demikian, keuntungan ekonomi terbesar tidak berada pada tahap penambangan bijih, melainkan pada pengolahan lanjutan menjadi precursor, cathode active material (CAM), sel baterai, dan sistem baterai kendaraan listrik. IEA juga menegaskan bahwa industri CAM merupakan komponen paling menentukan biaya baterai dan menjadi salah satu titik strategis

dalam rantai pasok kendaraan listrik global (I.E.A. International & Agency, 2026). Pengalaman negara-negara seperti Australia dan Kanada menunjukkan bahwa keberhasilan strategi mineral kritis tidak hanya ditentukan oleh besarnya cadangan yang dimiliki, tetapi juga oleh kemampuan membangun industri pengolahan, inovasi teknologi, dan rantai pasok yang terintegrasi (Powell, 2024).

Beberapa implikasi kebijakan yang dapat dipertimbangkan oleh Indonesia: (1) Menggeser fokus dari ekspansi produksi menuju peningkatan nilai tambah, dengan strategi hilirisasi yang diarahkan pada pengembangan industri precursor, CAM, sel baterai, dan manufaktur kendaraan listrik; (2) Menjaga keberlanjutan cadangan melalui pengendalian produksi dan eksplorasi cadangan baru secara seimbang; (3) Memperkuat kapasitas teknologi domestik melalui peningkatan riset, transfer teknologi, dan penguatan sumber daya manusia; (4) Mendorong diversifikasi teknologi baterai dengan mengantisipasi pertumbuhan LFP dan teknologi baterai generasi baru; dan (5) Mengembangkan sistem daur ulang baterai nasional sebagai sumber pasokan nikel sekunder yang penting (I.E.A. International & Agency, 2026; Energy Information Administration, 2024).

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemanfaatan nikel telah mengalami transformasi signifikan seiring berkembangnya industri kendaraan listrik dan transisi energi global, di mana baterai berbasis nikel (NMC dan NCA) tetap mempertahankan peran strategisnya pada segmen kendaraan listrik berperforma tinggi meskipun baterai LFP mengalami peningkatan pangsa pasar. Hasil simulasi BatPaC menunjukkan bahwa baterai NMC811-G dengan kapasitas 60 kWh memiliki densitas energi sel sebesar 325 Wh/kg dan biaya produksi baterai sekitar USD 119/kWh, dengan biaya material menyumbang komponen terbesar (49%), yang mengindikasikan bahwa nilai tambah ekonomi terbesar dalam rantai pasok baterai berada pada pengolahan lanjutan menjadi MHP, nikel sulfat, precursor, CAM, sel baterai, hingga battery pack, bukan pada kegiatan penambangan bijih. Analisis R/P Ratio menunjukkan penurunan dari 2.280,73 (2021) menjadi 3,04 (2030), yang mencerminkan meningkatnya tekanan konsumsi terhadap cadangan, namun tidak berarti cadangan akan segera habis karena sifat dinamis cadangan mineral yang dapat bertambah melalui eksplorasi dan kemajuan teknologi. Penelitian ini merekomendasikan agar Indonesia menggeser fokus strateginya dari ekspansi produksi menuju penguatan hilirisasi terintegrasi, memperkuat kapasitas riset dan transfer teknologi domestik, mendorong diversifikasi teknologi baterai, serta mengembangkan sistem daur ulang baterai nasional sebagai pilar keberlanjutan cadangan nikel jangka panjang dalam mendukung transisi energi dan pencapaian target Net Zero Emission 2060.

REFERENSI

Ahmed, S., Knehr, K. W., Effat, M. B., Kubal, J. J., & Li, Z. (2026). Designing automotive battery packs: sensitivity, case studies and insights using BatPaC. *Journal of Power Sources*, *671*, 239491.

(INSG), T. I. N. S. G. (2024). The World Nickel Factbook 2024.

Act, I. R., Outlook, E. V., & Ev, G. (n.d.). Bloomberg EVO2025-Executive-Summary.

Advertorial. (2025, February 18). Penjualan EV Tumbuh Agresif di 2025, BYD Pimpin Pasar dengan Portofolio Lengkap. Kompas.Com.

Ahmed, S., Nelson, P. A., Gallagher, K. G., Susarla, N., & Dees, D. W. (2017). Cost and energy demand of producing nickel manganese cobalt cathode material for lithium ion batteries. Journal of Power Sources, 342, 733–740.

Ahmeid, M., Muhammad, M., Lambert, S., Attidekou, P. S., & Milojevic, Z. (2022). A rapid capacity evaluation of retired electric vehicle battery modules using partial discharge test. Journal of Energy Storage, 50(April), 104562.

Ali, A. R., Lackner, J., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2023). Analysis of nickel sulphate datasets used in lithium-ion batteries. Procedia CIRP, 116, 348–353.

Amer, M., Masri, J., Dababat, A., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Electric vehicles: Battery technologies, charging standards, AI communications, challenges, and future directions. Energy Conversion and Management: X, 24.

Aniday.com. (2026). Indonesia Employer Costs: Complete Breakdown for 2026. https://aniday.com/en/blog/indonesia-employer-costs-complete-breakdown-for-3364

Argonne National Laboratory. (2022). Battery Performance and Cost Modeling for Electric-Drive Vehicles.

Ariyani, L., Aminullah, E., Hermawati, W., Febrianda, R., Husni, A., Rosadi, Y., & Dinaseviani, A. (2025). The global innovation system view for electric vehicles in Indonesia. Sustainable Futures, 9(December 2024), 100741.

Asadrokht, M., & Zakeri, A. (2022). Chemo-physical concentration of a Low-grade nickel laterite ore. Minerals Engineering, 178, 107398.

Barahmand, Z., & Eikeland, M. S. (2022). Techno-Economic and Life Cycle Cost Analysis through the Lens of Uncertainty: A Scoping Review.

Beletskii, E., Popov, A., Romanovski, V., Li, R., Bi, S., Dong, Y., & Yang, P. (2025). Screening and assessing vanadium oxide cathodes for zinc-ion batteries. Journal of Energy Storage, 134(PB), 118303.

BloombergNEF. (2025). New Record Lows for Battery Prices. https://about.bnef.com/insights/clean-transport/new-record-lows-for-battery-prices/

Börner, M. F. (2024). Berechnung der Kosten von Lithium-Ionen-Batteriezellen. RWTH Aachen University.

BPS-Statistics Indonesia. (2026). Physical Asset Accounts for Nickel Reserves Indonesia in Metal Content (Thousand Tons). https://www.bps.go.id

Cost Analysis of NMC Precursors. (2026). Cathode Solution. https://www.cathodesolution.com/post/cost-analysis-of-ternary-precursors

CRIRSCO. (2019). International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves.

Electric Vehicle Powertrain Market. (2025). Fortune Business Insights. https://www.fortunebusinessinsights.com/electric-vehicle-powertrain-market-102635

Energi, K., Sumber Daya Mineral., & Indonesia, R. (n.d.). Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional.

Energy Agency, I. (2025). Global EV Outlook 2025: Expanding Sales in Diverse Markets. www.iea.org

Energy Information Administration. (2024). Country Analysis Brief. https://www.eia.gov

Energy, U.S.D. of. (2023). Critical Materials Assessment. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/2023-critical-materials-assessment.pdf

Exchange, L. M. (2025). LME Nickel. https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel

Fraunhofer. (2022). Development Perspectives for Lithium-Ion Battery Cell Formats. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI.

Geurts, S., Kuepper, B., & Boev, P. (2025). The Destructive Indonesian Nickel Supply Chain: A Supply Chain Mapping & Risk Assessment.

Gianvincenzi, M., Viglia, S., Luigi, P., Marconi, M., Maria, E., & Tola, F. (2025). A Comprehensive Approach to Evaluating Environmental Sustainability of EV Batteries: Integrating BatPaC with LCA Indicators. ScienceDirect, 135, 350–355.

GIZ. (2025). Green Hydrogen for the C&I Sector.

Global Petrol Prices. (2026). Indonesia fuel prices, electricity prices. https://www.globalpetrolprices.com/Indonesia/electricity_prices/

Gutsch, M., & Leker, J. (2024). Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries. Applied Energy, 353(PB), 122132.

Holley, E. A., Malone, A., Fahle, L., Smith, N. M., Calderon, J., Eggert, R., Spiller, D. E., & Bazilian, M. D. (2025). Nickel and cobalt from U.S. mines and refineries: Assessment of five dimensions of mineral availability. Resources Policy, 108, 105687.

Horowitz, J., & Coffin, D. (2021). Supply Chain for EV Batteries: 2020 Trade and Value-added Update. Working Paper ID-072.

International Council on Clean Transportation. (2024). Investigating the U.S. battery supply chain and its impact on electric vehicle costs through 2032.

I.E.A. International, & Agency, E. (2023). Global EV Outlook 2023.

I.E.A. International, & Agency, E. (2026). Global EV Outlook 2026: Growing Sales amid an Energy Crisis.

International, K. (2021). Resourcing the Energy Transition.

Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science, knowledge service. (2021). Study on Future Demand and Supply Security of Nickel for Electric Vehicle Batteries. https://doi.org/10.2760/212807

Kampker, A., Heimes, H., Dorn, B., Clever, H., & Scheibe, A. (2023). Potentials and Implementation Strategies For Flexible Battery Cell Production, 874–883.

Kementerian PPN/Bappenas. (2025). Peta Jalan Dekarbonisasi Industri Nikel Indonesia.

Kiemel, S., Glöser-Chahoud, S., Waltersmann, L., Schutzbach, M., Sauer, A., & Miehe, R. (2021). Assessing the application-specific substitutability of lithium-ion battery cathode chemistries. Resources, 10(9). https://doi.org/10.3390/resources10090087

Koech, A. K., Mwandila, G., & Mulolani, F. (2024). A review of improvements on electric vehicle battery. Heliyon, 10(15), e34806.

Kubal, J. J., Knehr, K. W., Susarla, N., Tornheim, A., Dunlop, A. R., Dees, D. D., Jansen, A. N., & Ahmed, S. (2022). The influence of temperature on area-specific impedance and capacity of Li-ion cells. Journal of Power Sources, 543, 231864.

Lechner, M., et al. (2024). The role of cathode active materials in lithium-ion battery cost modeling. Journal of Power Sources, 582, 233522.

Li, W., Erickson, E. M., & Manthiram, A. (2020). High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries. Nature Energy, 5(1), 26–34.

Liberto, D. (n.d.). Reserves-to-Production Ratio: Overview, Examples, FAQ. Investopedia.

London Metal Exchange. (2026). LME Nickel. https://www.lme.com/metals/non-ferrous/lme-nickel

Mass, R. C., Liu, C., Li, Y., Mai, L., & Cao, G. (2017). Energy storage through intercalation reactions: electrodes for rechargeable batteries. National Science Review, 4(1), 26–53.

Meinert, L. D., Robinson, G. R., & Nassar, N. T. (2016). Mineral resources: Reserves, peak production and the future. Resources, 5(1). https://doi.org/10.3390/resources5010014

Melhem, Z. (2013). Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems. Woodhead Publishing Limited.

Mezei, F. (2011). Basics Concepts. In Neutrons in Soft Matter. https://doi.org/10.1002/9780470933886.ch1

MINERAL, K.E.D.S.D., & INDONESIA, R. (2020). Peluang Investasi Nikel Indonesia.

Murakami, S. (2019). Critical Minerals and Recycling. https://www.everycrsreport.com/reports/R45810.html
Nelson, P. A., Bloom, K. G., & Dees, D. W. (2011). Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles. Argonne National Laboratory.
Nirmala Maulana Achmad, T. M. V. A. (2025, February 18). Indonesia Diproyeksikan Punya 1 Juta Kendaraan Listrik pada 2030. Kompas.Com.
Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nature Climate Change, 5(4), 329–332.
Pereyra, J., Lou, J., Hilde, T., Squire, C., Susanto, S. K., & Pradipta, A. (2024). Mining, Manufacturing, and Markets.
Powell, S. (2024, June 19). Net zero unlocks the nation's critical minerals potential. The Australian.
Raza, S., Khan, M., Srivastava, K., Jin, H., Plante, L., Lee, J. J., Barstow, B., Reed, D. W., & Sierra, R. (2025). Sustainable recovery of critical metals from spent lithium-ion batteries through gluconic acid-based bioleaching. Chemical Engineering Journal, 516, 163714.
Rosilah, S., Hannan, M. A., Jern, P., Wong, R. T. K., Begum, R. A., Hossain, M. J., & Jang, G. (2025). Longevity of lithium-ion batteries in EV applications. Journal of Energy Storage, 131(PA), 117551.
Schramm, J. (2025). Investing In Nickel: The Evergreen Metal For Sustainability. https://www.securities.io/investing-in-nickel/
Scrufield, T., Salomon, M., & Olang, S. (2024). Six Keys to Unlocking Equitable Value Addition in Mining. https://resourcegovernance.org/publications/six-keys-unlocking-equitable-value-addition-mining
Seo, J., Vu, T. T., Cho, S., Cha, J., Choi, Y., Kim, H., & Song, D. (2025). Techno-economic evaluation of Lithium hydroxide recovery from waste battery effluent. Journal of Energy Storage, 125, 117002.
Slotte, P., Pohjalainen, E., & Hanski, J. (2025). Effect of life extension strategies on demand and recycling of EV batteries. Resources, Conservation & Recycling, 215.
Survey, U.S.G. (2025). Mineral Commodity Summaries 2025.
Trading Economics. (2025). Indonesia Average Monthly Wages in Manufacturing. https://tradingeconomics.com/indonesia/wages-in-manufacturing
Underhill, L. J., Singh, L. J., & Males, L. J. (2024). Approved Judgment.
Veza, I., Abas, M. A., Djamari, D. W., Tamaldin, N., Endrasari, F., Budiman, B. A., Idris, M., Opia, A. C., Juangsa, F. B., & Aziz, M. (2022). Electric Vehicles in Malaysia and Indonesia: Opportunities, 1–24.
Wentker, M., Greenwood, M., & Leker, J. (2019). A bottom-up approach to lithium-ion battery cost modeling with a focus on cathode active materials. Energies, 12(3), 1–18.
Wesselkaemper, J., Thakre, P., Ward, A., & Haddad, A. Z. (2026). Primary material supply configurations and domestic recycling for cost-effective battery material production in the US. Nature Communications, 17(1), 1–12.
Wienda, Y., Wahyu, W., Tezuka, T., Mclellan, C., Hartono, D., Hidayatno, A., & Daud, Y. (2018). Multi-objective optimization of a multiregional electricity system in an archipelagic state. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 423–439.
Yang, Z., et al. (2025). Structural cost analysis of nickel-rich cathode materials for lithium-ion batteries. Energy, 290, 130100.