Apa Keunggulan LFP Dibandingkan Baterai Berbasis Nikel?

Perbandingan LFP dengan kimia NMC/NCA untuk kendaraan listrik

Oleh: **Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD**
www.rudyct.com/cv.pdf
Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst | IBM-ASMI



LFP
(Lithium Iron Phosphate)

- Tanpa nikel dan kobalt
- Biaya material berpotensi lebih rendah
- Stabilitas termal relatif baik
- Umur siklus berpotensi panjang
- Cocok untuk kendaraan massal dan rute harian

NMC/NCA
(Nickel Manganese Cobalt / Nickel Cobalt Aluminium)

- Kepadatan energi umumnya lebih tinggi
- Mendukung jarak jauh dengan paket lebih ringkas
- Nilai material daur ulang dapat lebih tinggi
- Memerlukan pengelolaan termal yang matang
- Cocok saat massa dan ruang baterai terbatas

Tidak ada kimia yang unggul untuk semua kebutuhan.
Pilih berdassarkan jarak, biaya, iklim, pola pengisian, keselamatan, dan daur hidup.

Hasil aktual bergantung pada desain sel, paket baterai, sistem manajemen baterai (BMS), kendaraan, dan kondisi pengoperasian.

RudyCT Academic Series

Apa Keunggulan LFP Dibandingkan Baterai Berbasis Nikel?

Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD
www.rudyct.com/cv.pdf

IBM-ASMI | **RudyCT Academic Series**

Naskah analitis; data pasar dan kebijakan ditelaah hingga 22 Oktober 2026

Abstract

This article compares lithium iron phosphate (LFP) batteries with nickel-bearing lithium-ion chemistries, principally nickel manganese cobalt (NMC) and nickel cobalt aluminum (NCA), for electric vehicles. The central argument is that LFP's strongest advantages are its lower material cost, comparatively robust thermal behavior, long service potential under suitable operating conditions, and reduced dependence on nickel and cobalt. These strengths have helped LFP become a leading chemistry in mass-market vehicles and stationary storage. Its limitations include lower cell-level energy density, weaker cold-weather performance, and lower recycling value per unit of mass when compared with nickel-rich batteries. Pack design, charging controls, vehicle efficiency, electricity mix, mineral sourcing, and end-of-life management can alter the comparison. LFP is therefore not universally superior, nor are nickel-based batteries obsolete. The practical choice depends on the required range, payload, climate, charging access, safety architecture, lifetime cost, and supply-chain objectives. For Indonesia, the rise of LFP is a reason to broaden industrial capability: retain responsible nickel-based production for applications that reward energy density while building expertise in LFP materials, pack engineering, recycling, testing, and battery management. The

article combines recent market data with technical and life-cycle research and presents decision frameworks for consumers, fleets, manufacturers, investors, and public policy.

Kata Kunci

LFP; lithium iron phosphate; baterai EV; NMC; NCA; kepadatan energi; keselamatan baterai; daur ulang; rantai pasok; Indonesia.

1. Pendahuluan: pertanyaan yang tepat tentang LFP dan nikel

Perdebatan mengenai baterai kendaraan listrik sering diringkas menjadi pertanyaan apakah LFP lebih baik daripada nikel. Rumusan itu perlu diperjelas. LFP adalah jenis kimia katoda dalam baterai lithium-ion, sedangkan nikel merupakan unsur yang menjadi bagian penting katoda pada beberapa kimia lain, terutama NMC dan NCA. Dengan demikian, perbandingan yang tepat bukan baterai dengan unsur tunggal, melainkan dua kelompok desain baterai lengkap yang meliputi katoda, anoda, elektrolit, separator, sel, modul, paket, sistem manajemen, dan kendali termal. Keunggulan sebuah kimia pada tingkat material tidak otomatis menjamin keunggulan kendaraan pada tingkat penggunaan.

Kepentingan pertanyaan ini meningkat karena pertumbuhan pasar EV berlangsung bersamaan dengan perubahan cepat dalam teknologi sel dan model bisnis produsen. LFP sering dikaitkan dengan kendaraan yang lebih terjangkau, keselamatan termal yang lebih baik, dan umur siklus yang panjang. Kimia kaya nikel dipilih ketika kendaraan memerlukan energi lebih besar dalam massa atau ruang baterai yang terbatas. Kedua kelompok juga memiliki biaya bahan baku, sumber pasokan, proses produksi, dan peluang daur ulang yang berlainan. Konsumen mungkin lebih mementingkan harga dan kecukupan jarak harian, sedangkan operator bus atau truk menilai bobot, waktu pengisian, kapasitas muatan, serta waktu berhenti.

Artikel ini menjawab pertanyaan dengan membandingkan LFP dengan NMC dan NCA dari sisi kimia, keselamatan, kepadatan energi, performa suhu, umur, biaya, dampak lingkungan, pasar, dan strategi industri. Fokusnya adalah baterai traksi

EV, walaupun beberapa pembelajaran berlaku pada penyimpanan energi stasioner. Data pasar yang dipakai dibatasi sampai 22 Oktober 2026; angka proyeksi diperlakukan sebagai skenario, bukan kepastian. Kesimpulan awalnya ialah LFP menawarkan keunggulan nyata bagi banyak kendaraan massal dan penyimpanan, sementara kimia berbasis nikel tetap bernilai bagi aplikasi yang sangat sensitif terhadap massa dan volume. Pilihan terbaik harus dimulai dari kebutuhan layanan, lalu diuji pada keseluruhan sistem kendaraan dan siklus hidupnya.

2. Memastikan istilah dan batas perbandingan

LFP adalah singkatan dari lithium iron phosphate, dengan rumus katoda $LiFePO_4$. Dalam bahasa Indonesia, istilah yang lazim ialah litium-besi-fosfat. Unsur litium berpindah sebagai ion melalui elektrolit saat sel diisi dan digunakan. Besi dan fosfat membentuk struktur katoda, sedangkan anoda umumnya berbasis grafit. Katoda LFP tidak memakai nikel maupun kobalt sebagai unsur aktif utama. Hal ini membedakan LFP dari NMC—lithium nickel manganese cobalt oxide—dan NCA—lithium nickel cobalt aluminum oxide. Susunan komposisi NMC bervariasi: sebutan seperti NMC 111, 622, atau 811 menunjukkan rasio nominal nikel, mangan, dan kobalt, bukan spesifikasi lengkap seluruh sel.

Ungkapan “baterai nikel” juga tidak boleh menyiratkan bahwa nikel sendiri menyimpan energi atau bahwa setiap baterai lithium-ion mengandung nikel. Nikel bekerja sebagai bagian dari material katoda berlapis yang dapat mendukung kapasitas dan energi spesifik tinggi. NCA dan NMC berbeda pada komposisi serta rekayasa elektrodanya, dan setiap keluarga memiliki variasi manufaktur. Di sisi lain, LFP juga tetap membutuhkan litium, grafit, tembaga, aluminium, elektrolit, dan berbagai komponen lain. Menghilangkan nikel dari katoda berarti mengubah profil ketergantungan mineral, bukan membuat baterai bebas dari dampak pertambangan atau rantai pasok.

Artikel menggunakan istilah “unggul” secara bersyarat. Keunggulan berarti lebih sesuai terhadap tujuan tertentu—misalnya biaya awal lebih rendah atau

kebutuhan jarak tempuh terpenuhi dengan paket yang lebih ringan—bukan skor mutlak untuk semua ukuran. Perbandingan harus menggunakan fungsi yang sama. Menilai satu kilogram sel tanpa melihat paket dapat meremehkan keuntungan desain struktur; membandingkan biaya per kilowatt-jam tanpa mempertimbangkan ukuran baterai, garansi, dan efisiensi kendaraan dapat menyesatkan. Karena kimia, bentuk sel, sistem pendinginan, perangkat lunak, dan proses produksi saling terkait, klaim yang terlalu umum perlu dibatasi oleh kondisi uji serta data produk yang nyata.

3. Cara kerja dasar kimia baterai

Dalam sel lithium-ion, ion litium bergerak bolak-balik antara katoda dan anoda, sementara elektron mengalir melalui sirkuit luar untuk melakukan kerja. Ketika baterai diisi, sumber listrik mendorong ion menuju anoda; ketika kendaraan beroperasi, proses berbalik dan energi listrik memasok motor serta sistem kendaraan. Tegangan, kapasitas, laju reaksi, dan stabilitas sel bergantung pada material aktif dan arsitektur sel. Karena itu, nama kimia katoda hanya satu bagian dari penjelasan kinerja. Ketebalan elektroda, ukuran partikel, komposisi elektrolit, tingkat pemadatan, jenis anoda, dan pengendalian panas berpengaruh terhadap energi yang benar-benar dapat dipakai.

Struktur olivin LFP memiliki ikatan fosfat yang kuat dan kerangka kristal yang stabil. Karakter ini turut menjelaskan kestabilan termal serta kecenderungan pelepasan oksigen yang berbeda dari sebagian oksida berlapis kaya nikel saat mengalami panas ekstrem. Struktur tersebut sekaligus memberi batas pada tegangan dan kapasitas spesifik katoda yang dapat dicapai dengan desain komersial saat ini. Pada NMC dan NCA, pengaturan kandungan nikel membantu meningkatkan kapasitas dan energi katoda, tetapi stabilitas material pada kondisi pengisian tinggi menjadi tantangan desain yang perlu ditangani melalui komposisi, pelapisan, aditif, serta kendali baterai.

Kinerja sel harus dibedakan dari kinerja paket. Sel disusun menjadi unit yang lebih besar, dilengkapi sistem pemantauan, pengaman listrik, pendinginan, struktur

penahan benturan, dan perangkat lunak. Sebuah kimia dengan energi sel lebih tinggi mungkin memerlukan ruang serta massa tambahan untuk sistem pendukung; sebaliknya, sel yang memiliki stabilitas termal lebih tinggi mungkin memungkinkan arsitektur paket yang lebih sederhana. Dengan demikian, sifat dasar kimia membuka peluang teknis, tetapi keputusan rekayasa menentukan seberapa banyak peluang itu sampai kepada pengemudi sebagai jarak tempuh, daya, keselamatan, dan biaya.

4. Ringkasan komparatif LFP, NMC, dan NCA

Secara umum, LFP dikenal karena biaya bahan aktif yang kompetitif, tidak bergantung pada nikel dan kobalt di katodanya, serta kestabilan termal yang relatif baik. NMC dan NCA biasanya menawarkan kepadatan energi gravimetrik dan volumetrik yang lebih tinggi, sehingga dapat menyimpan lebih banyak energi dalam ruang dan massa yang sama. LFP kerap berpotensi memiliki umur siklus tinggi, tetapi hasil aktual tergantung temperatur, kedalaman pengosongan, arus, tegangan, dan kualitas sel. NMC/NCA memiliki jalur pemulihan logam bernilai yang lebih kuat pada daur ulang, walaupun prosesnya juga intensif energi dan harus dikendalikan secara lingkungan.

Matriks berikut memberi orientasi, bukan pengganti spesifikasi kendaraan. Rentang maupun urutan dapat berubah ketika pembuat sel memakai desain berbeda, dan produsen sering tidak menerbitkan seluruh data pengujian. Pada tingkat paket, metode cell-to-pack dan cell-to-body dapat memperkecil sebagian kesenjangan antara LFP dan kimia kaya nikel. Kinerja musim dingin juga dipengaruhi pemanas baterai, strategi pengisian, dan insulasi. Untuk menilai satu model kendaraan, data uji independen serta garansi yang tertulis lebih berguna daripada tabel generik pemasaran.

Pilihan yang masuk akal adalah menyesuaikan kimia dengan profil penggunaan. LFP sering menarik ketika biaya, keselamatan pasif relatif, dan pemakaian berulang menjadi prioritas, sementara sedikit tambahan massa dapat diterima. NMC atau NCA dapat dipilih ketika ukuran bodi membatasi kapasitas, jarak

antarpengisian jauh, atau kendaraan memerlukan energi tinggi dengan muatan besar. Banyak pabrikan menggunakan strategi portofolio: satu kimia untuk model harga terjangkau dan kimia lain untuk varian jarak jauh atau performa tinggi. Strategi itu menunjukkan bahwa pasar lebih mungkin terbagi menurut kebutuhan daripada dimenangkan secara tunggal oleh satu kimia.

5. Biaya bahan dan harga baterai

Keunggulan biaya LFP berawal dari komposisi katoda yang tidak memerlukan nikel dan kobalt. Kedua logam tersebut dapat memiliki harga yang berfluktuasi karena siklus komoditas, kendala produksi, konsentrasi pemrosesan, serta kebijakan negara produsen. Bahan aktif LFP dan rute manufakturnya dapat mengurangi eksposur terhadap fluktuasi itu. IEA melaporkan bahwa pada 2024 harga paket LFP per kilowatt-jam hampir 30% lebih rendah daripada NMC, dan harga baterai LFP pada 2025 secara rata-rata lebih dari 40% di bawah alternatif NMC. Angka terakhir perlu dibaca hati-hati karena banyak aplikasi penyimpanan stasioner memakai LFP dan karakter paketnya memengaruhi rata-rata biaya (IEA, 2025, 2026).

Keunggulan harga tidak semata-mata disebabkan kimia. Skala produksi, utilisasi pabrik, hasil produksi yang lolos mutu, tingkat otomasi, integrasi pemasok, energi listrik, biaya tenaga kerja, dan intensitas persaingan ikut menentukan harga sel. Pusat manufaktur LFP yang besar dapat menciptakan pembelajaran dan biaya satuan lebih rendah. Sebaliknya, pabrik baru yang belum mencapai hasil produksi tinggi bisa mahal meskipun bahan bakunya lebih murah. Karena itu, negara yang ingin membangun kapasitas domestik perlu melihat pengalaman operasi, akses teknologi, kontrak bahan, dan volume pembeli, bukan hanya biaya teoritis katoda.

Perusahaan juga perlu menghindari kesalahan menyamakan harga sel, harga paket, dan harga kendaraan. Paket memerlukan sistem manajemen, kabel, pendinginan, struktur mekanik, dan sertifikasi keselamatan. Penghematan pada bahan aktif bisa berkurang jika paket lebih besar atau membutuhkan perangkat

pengendalian tambahan. Namun, biaya baterai yang lebih rendah tetap dapat memperluas pasar EV karena harga pembelian merupakan penghalang bagi banyak rumah tangga. Jika LFP membuat kendaraan jarak menengah terjangkau, manfaat sosial pasar dapat lebih besar daripada peningkatan kecil jarak tempuh yang hanya digunakan sesekali oleh sebagian pengemudi.

6. Keselamatan termal dan manajemen risiko

Salah satu daya tarik LFP adalah kestabilan termal yang relatif lebih baik pada tingkat material katoda. Dalam kondisi yang memicu kegagalan, karakter ikatan fosfat dapat mengurangi kecenderungan katoda melepas oksigen dibanding sebagian material oksida berlapis. Eksperimen dan analisis sistem menunjukkan bahwa risiko perambatan thermal runaway dipengaruhi oleh kimia, desain sel, jarak antar-sel, ventilasi, sistem pendinginan, serta perlindungan paket. Karena itu, LFP dapat memberi margin keselamatan yang lebih baik pada kondisi tertentu, tetapi bukan jaminan bahwa kebakaran tidak akan terjadi (Schöberl et al., 2024).

Semua baterai lithium-ion mengandung elektrolit organik yang dapat terbakar dan menyimpan energi besar. Hubung singkat, cacat manufaktur, benturan, penetrasi benda, pengisian yang salah, atau kegagalan sistem pendinginan dapat menimbulkan panas berlebih. Ketika satu sel gagal, gas, panas, dan tekanan bisa memengaruhi sel di sekitarnya. Kebakaran baterai memiliki tantangan pemadaman serta potensi penyalaan ulang. LFP mengubah karakter risiko dan tingkat keparahan pada sejumlah kondisi, tetapi pengendalian keselamatan tetap memerlukan desain kendaraan yang baik, sensor, pemutusan arus, perlindungan mekanik, pengujian, dan prosedur darurat yang tepat.

Bagi pembeli, perbandingan keselamatan hendaknya memeriksa hasil uji paket dan kendaraan, bukan hanya tabel suhu awal thermal runaway sel. Satu kendaraan dengan LFP dapat memiliki desain sistem yang buruk; kendaraan dengan NMC dapat memiliki manajemen termal dan perlindungan yang matang. Operator armada perlu memantau temperatur, ketidakseimbangan sel, kejadian

benturan, dan tanda kerusakan. Petugas tanggap darurat membutuhkan panduan lokasi pemutus tegangan tinggi, informasi jenis baterai, zona aman, dan mekanisme pemantauan pascakejadian. Dengan kata lain, keunggulan kimia LFP dapat memperkuat keselamatan berlapis, tetapi tidak dapat menggantikan keselamatan rekayasa dan operasional.

7. Kepadatan energi dan jarak tempuh

Kepadatan energi menjelaskan berapa banyak energi yang dapat disimpan per massa atau volume. Karena katoda LFP memiliki batas tegangan dan kapasitas tertentu, sel NMC atau NCA komersial sering mencapai energi lebih tinggi per kilogram dan per liter. Pada kendaraan, energi yang lebih tinggi dalam volume tertentu dapat memperpanjang jarak tempuh atau menjaga kabin tetap luas tanpa menambah ukuran paket. Keuntungan ini bermakna untuk kendaraan premium, kendaraan yang harus menempuh rute antarkota, kendaraan niaga dengan muatan berat, serta desain yang memiliki ruang terbatas.

IEA pada 2025 menyebut paket LFP sekitar seperlima lebih rendah secara gravimetrik dan sekitar sepertiga lebih rendah secara volumetrik dibanding paket NMC pada rata-rata yang dibahas di laporan tersebut. Akan tetapi, jarak tempuh tidak ditentukan oleh kimia saja. Aerodinamika, hambatan ban, massa kendaraan, efisiensi motor, suhu kabin, gaya mengemudi, topografi, dan kecepatan berpengaruh terhadap konsumsi. Peningkatan efisiensi kendaraan dapat memberi manfaat serupa dengan menambah kapasitas baterai, sekaligus menurunkan kebutuhan mineral dan biaya pengisian. Perbandingan praktis perlu mengacu pada uji jalan dengan kondisi dan ukuran kendaraan yang sebanding.

LFP bisa tetap cukup untuk sebagian besar perjalanan sehari-hari. Bila perjalanan rata-rata harian jauh di bawah kapasitas baterai, kapasitas ekstra dari kimia kaya nikel mungkin jarang digunakan. Sebaliknya, ketika pengemudi sering menempuh perjalanan jauh dengan waktu berhenti singkat, rentang jarak tempuh yang lebih besar dapat mengurangi frekuensi pengisian dan meningkatkan produktivitas. Perbedaan kebutuhan ini perlu dibedakan dari

kecemasan jarak tempuh yang tidak sesuai pola pemakaian. Desain paket yang lebih baik juga dapat menutup sebagian kesenjangan: pengemasan sel besar, optimalisasi struktur, dan teknik pendinginan meningkatkan energi yang berguna tanpa semata-mata mengganti kimia.

8. Integrasi dari sel menuju paket kendaraan

Perbandingan yang hanya memakai data sel dapat menyesatkan karena kendaraan mengangkut paket, bukan satu sel. Sel memerlukan ruang antar-komponen, sistem pendingin, penyangga, pelindung benturan, konektor, sensor, dan modul elektronik. Desain paket tradisional menggunakan modul sebagai lapisan tambahan, sedangkan cell-to-pack berupaya menempatkan sel langsung ke paket untuk mengurangi komponen pasif. Koloch dan kolega (2025) menunjukkan bahwa kimia NMC dan NCA unggul dalam kepadatan energi sel, tetapi LFP dapat memperkecil kesenjangan pada tingkat paket melalui rasio cell-to-pack yang baik.

Ukuran dan bentuk sel juga penting. Sel prismatik besar dapat meningkatkan efisiensi pengemasan, namun memerlukan strategi disipasi panas dan perlindungan yang sesuai. Sel silinder bisa memberikan konsistensi produksi dan jalur pendinginan tertentu, sedangkan sel pouch dapat menawarkan fleksibilitas bentuk dengan tantangan dukungan mekanik. Perbandingan yang adil menghitung energi paket yang dapat digunakan, massa total, volume, daya puncak, rentang temperatur, kebutuhan pendingin, dan tingkat redundansi. Teknologi struktur kendaraan yang mengintegrasikan paket ke sasis dapat mengubah hasil ekonomi, tetapi juga memengaruhi perbaikan dan penggantian modul setelah kecelakaan.

Pertimbangan integrasi menggeser fokus dari “sel mana paling padat energi?” menjadi “sistem kendaraan mana memberikan layanan yang diminta dengan biaya dan risiko terendah?” Jika LFP mencapai kapasitas yang diperlukan dengan paket aman, hemat, dan efisien, keunggulan kepadatan energi NMC mungkin tidak cukup untuk mengimbangi selisih biaya. Jika ruang bagasi, beban

kendaraan, atau target jarak menjadi batas utama, teknologi kaya nikel mungkin menjadi pilihan yang lebih baik. Keputusan desain awal akan mengunci banyak faktor produksi dan layanan purnajual, sehingga kolaborasi antara produsen sel, OEM, insinyur kendaraan, dan penyedia sistem manajemen harus berlangsung sejak awal.

9. Umur siklus, umur kalender, dan degradasi

Umur baterai mempunyai sekurangnya dua dimensi. Umur siklus mengukur perubahan setelah pengisian dan pengosongan berulang, sedangkan umur kalender mengukur perubahan ketika baterai disimpan atau digunakan seiring waktu. Keduanya dipengaruhi temperatur, kondisi pengisian, kecepatan arus, kedalaman pengosongan, desain elektroda, dan kualitas manufaktur. LFP kerap memiliki reputasi umur siklus panjang, khususnya pada penggunaan rutin dan rentang pengisian yang sesuai. Namun, angka ribuan siklus di brosur tidak dapat langsung diterjemahkan menjadi jarak tempuh atau tahun pemakaian tanpa mengetahui kondisi uji dan kapasitas akhir yang didefinisikan.

Studi eksperimental Ohneseit dan kolega (2025) membandingkan sel komersial NMC, NCA berenergi tinggi, NCA berdaya tinggi, dan LFP dalam protokol penuaan kalender serta siklus. Dalam pengujian mereka, sel NMC terdegradasi paling cepat pada kondisi yang diuji, tetapi sel NCA berenergi tinggi paling tahan pada sebagian besar prosedur; LFP hanya unggul pada salah satu prosedur siklus. Hasil ini mengingatkan bahwa kesimpulan menyeluruh tidak bisa ditarik dari nama kimia saja. Perbandingan harus melihat desain komersial, laju pengujian, temperatur, rentang state-of-charge, dan energi total yang tersalurkan.

Bagi pengguna, umur ekonomis ditentukan oleh kapan kapasitas atau daya turun di bawah kebutuhan layanan atau batas garansi. Pengemudi mungkin masih dapat menggunakan kendaraan saat baterai menyimpan energi lebih sedikit, sedangkan armada berjadwal ketat dapat menganggap penurunan daya sebagai gangguan lebih awal. Sistem diagnostik yang memantau state of health, resistansi, distribusi temperatur, dan ketidakseragaman sel membantu

merencanakan perawatan. Produsen sebaiknya mengomunikasikan garansi dalam satuan yang mudah dibandingkan: tahun, jarak, kapasitas minimum, batas pengisian, serta pengecualian. Pembeli dapat menilai biaya per kilometer selama masa pakai, bukan hanya biaya pembelian baterai baru.

10. Pengisian harian dan strategi state of charge

LFP sering lebih toleran terhadap pengisian hingga state of charge tinggi dalam pemakaian tertentu, sehingga kapasitas nominalnya dapat dimanfaatkan lebih luas. NMC dan NCA juga dapat diisi ke tingkat tinggi, tetapi pengoperasian berulang pada tegangan maksimum dapat mempercepat degradasi pada sejumlah desain. Banyak kendaraan membatasi batas atas pengisian yang direkomendasikan untuk penggunaan harian atau menyarankan pengisian penuh berkala demi kalibrasi estimasi kapasitas. Petunjuk pabrikan harus didahulukan karena perangkat lunak manajemen baterai dan komposisi sel spesifik menentukan strategi yang aman.

Kecepatan pengisian bergantung pada daya stasiun, suhu sel, kimia, desain elektrode, status pengisian, dan sistem pendingin. Ketika pengisian mendekati penuh, banyak baterai menurunkan arus untuk melindungi sel. Pengemudi yang mengandalkan pengisian cepat dapat membandingkan kurva pengisian dari 10% sampai 80%, bukan sekadar angka daya puncak. LFP tidak otomatis selalu lebih cepat; paket dan strategi termal dapat membuat satu model sangat berbeda dari model lain. Kapasitas pengisian harian di rumah, kantor, atau depo armada juga dapat mengubah nilai rentang jarak dan kecepatan pengisian tinggi.

Manajemen pengisian menghubungkan kimia dengan kebiasaan pengguna. Kendaraan yang diisi secara teratur pada daya sedang mungkin mengalami kondisi penuaan berbeda dari kendaraan yang sering menerima arus tinggi dan terparkir lama pada kondisi penuh dalam cuaca panas. Pengelola armada dapat menjadwalkan pengisian di luar jam puncak dan menyesuaikan batas pengisian berdasarkan kebutuhan perjalanan hari berikutnya. Kebijakan tersebut mengurangi biaya listrik dan dapat mengurangi stres baterai. Karena data

penggunaan nyata sangat bervariasi, klaim “dapat diisi 100% setiap hari” perlu dibaca dalam konteks anjuran produsen, kondisi temperatur, dan kebutuhan kalibrasi sistem.

11. Performa di iklim panas dan dingin

Indonesia beriklim tropis dengan suhu lingkungan tinggi di banyak wilayah, sehingga perlindungan panas dan pendinginan paket penting untuk seluruh jenis baterai. LFP mempunyai karakter termal yang menguntungkan pada tingkat katoda, tetapi sel tetap mengalami penuaan lebih cepat apabila panas berlebih berlangsung lama. Sistem pendinginan cair, kontrol beban, pelindung panas, dan penempatan paket dapat mengurangi risiko tersebut. NMC dan NCA juga dapat beroperasi dengan aman ketika sistem termal dirancang secara tepat; konsekuensinya, biaya dan konsumsi energi untuk mengendalikan suhu perlu dimasukkan dalam perbandingan kendaraan.

Di suhu rendah, laju reaksi elektrokimia melambat dan hambatan internal meningkat. LFP dapat menunjukkan penurunan daya atau kapasitas yang dapat digunakan lebih besar dibanding sebagian desain nikel pada kondisi dingin. Pemanas baterai dan prakondisi sebelum perjalanan membantu, tetapi menggunakan energi dan dapat memengaruhi jarak tempuh saat pengisian daya tidak tersedia. NMC/NCA sering memiliki keuntungan untuk aplikasi dingin atau jarak jauh, namun keunggulan itu bukan sifat mutlak setiap produk. Perlu menguji kendaraan pada rentang iklim yang relevan, termasuk kemampuan mengisi cepat setelah kendaraan lama terparkir dalam keadaan dingin.

Pemilihan baterai untuk Indonesia tidak hanya membandingkan suhu ekstrem. Kendaraan dapat menghadapi paparan panas parkir, lalu lintas padat, pengisian cepat berulang, genangan air, kelembapan, jalan berlubang, dan beban kabin. Pusat pengujian nasional dapat mereplikasi kondisi seperti ini untuk memastikan strategi pendinginan, ketahanan konektor, perlindungan korosi, dan algoritma pengisian berfungsi sesuai kebutuhan setempat. Pengetahuan lokal memberi nilai tambah besar: spesifikasi yang berhasil pada iklim sedang belum tentu

cukup untuk armada di kota tropis. Kemitraan perguruan tinggi, lembaga uji, produsen, dan operator dapat mempercepat pembentukan data lapangan yang terbuka dan dapat dibandingkan.

12. Dampak biaya pada kendaraan dan pelanggan

Harga baterai adalah salah satu komponen biaya kendaraan listrik, tetapi keputusan pelanggan didorong oleh harga kendaraan secara keseluruhan, biaya listrik, akses pengisian, garansi, dan nilai jual kembali. Jika LFP mengurangi harga paket, pabrikan bisa menurunkan harga jual atau mempertahankan harga sambil menyediakan fitur lain. Penurunan harga dapat memperluas akses terhadap mobil listrik bagi rumah tangga dan usaha kecil. Bila konsumen membutuhkan jarak tempuh jauh, penghematan harga LFP mungkin diimbangi kebutuhan paket lebih besar. Apabila tambahan sel tidak terlalu mahal dan kendaraan tetap efisien, total biaya dapat tetap kompetitif.

Penghematan per kWh bukan satu-satunya ukuran nilai. Baterai yang lebih berat bisa memerlukan suspensi, ban, dan struktur kendaraan yang disesuaikan; kendaraan juga menghabiskan energi lebih besar untuk menggerakkan massa tambahan. Di sisi lain, material katoda yang lebih murah memberi ruang untuk paket berkapasitas lebih besar tanpa kenaikan harga sebesar paket NMC. Perbandingan total cost of ownership harus mencakup konsumsi energi kendaraan, asuransi, perawatan, garansi, depresiasi, penggantian baterai, dan biaya waktu. Untuk armada, biaya downtime kendaraan dapat mengalahkan perbedaan kecil dalam harga pembelian.

Bagi pembeli, contoh sederhana memperlihatkan pentingnya pemakaian. Jika perjalanan sehari-hari hanya 50 kilometer dan kendaraan rutin diisi semalaman, paket berkapasitas sedang dengan LFP mungkin telah memenuhi kebutuhan tanpa biaya untuk rentang berlebih. Pengemudi yang sering menempuh rute antarkota dan tidak memiliki pengisian cepat sepanjang perjalanan mungkin menilai paket NMC/NCA lebih tinggi karena mengurangi jeda. Perhitungan tidak boleh menganggap semua orang memiliki kondisi sama. Dealer dan platform

penjualan sebaiknya menyediakan kalkulator berdasarkan perjalanan nyata, bukan hanya angka jarak tempuh laboratorium atau klaim jarak maksimum.

13. Biaya operasi armada dan layanan publik

Armada bus, taksi, kendaraan pengiriman, dan kendaraan layanan pemerintah harus memilih baterai menurut jadwal serta rute operasional. Bus perkotaan yang kembali ke depo pada malam hari dapat memakai pengisian terencana dan paket LFP dengan siklus rutin. Jika tersedia pengisian antara pada terminal, kapasitas baterai dapat dioptimalkan agar bobot kendaraan berkurang. Truk jarak jauh membutuhkan energi besar, waktu pengisian yang singkat, dan daya tahan dalam pemakaian intensif; pada sebagian skenario, kimia berenergi tinggi dapat meningkatkan muatan efektif. Namun, pengisian megawatt dan infrastruktur depo mungkin mengubah perbandingan tersebut.

Operator perlu menghitung kapasitas baterai berdasarkan rute paling berat yang realistis, bukan sekadar rute rata-rata. Variasi lalu lintas, tanjakan, suhu, berat muatan, penggunaan pendingin udara, dan kemacetan menciptakan ketidakpastian. Simulasi perjalanan dan telematika dapat menemukan kapasitas yang diperlukan tanpa menambah cadangan berlebihan. LFP dapat mendukung pemakaian intensif apabila umur siklus, kondisi garansi, dan pengisian depo sesuai; NMC dapat menguntungkan ketika muatan dan jarak mengharuskan paket lebih ringan. Penjadwalan yang baik mengurangi jumlah kendaraan cadangan dan memperbaiki ekonomi proyek.

Pengadaan publik juga perlu mempertimbangkan konsistensi armada, layanan suku cadang, kemampuan teknisi lokal, dan biaya selama 8–15 tahun. Kontrak hanya berdasarkan harga awal dapat mendorong pemasok menawarkan konfigurasi yang tampak murah tetapi tidak cocok dengan operasi. Dokumen tender dapat meminta profil performa pada suhu tropis, kurva pengisian, kapasitas tersedia akhir garansi, sistem monitoring, dan dukungan pengelolaan baterai bekas. Uji coba rute dengan kendaraan yang berbeda kimia memberi pemerintah data nyata untuk memperbaiki spesifikasi. Keputusan yang berbasis

kinerja layanan menghindari pilihan baterai sebagai tren atau simbol teknologi semata.

14. Dampak lingkungan sepanjang daur hidup

LFP sering memiliki jejak lingkungan material katoda yang lebih rendah daripada NMC karena tidak mengandung nikel dan kobalt serta memakai unsur besi dan fosfat yang lebih umum. Akan tetapi, kinerja daur hidup melibatkan penambangan litium dan grafit, produksi bahan aktif, listrik untuk pengeringan dan pembentukan sel, transportasi, penggunaan kendaraan, dan pengolahan akhir. Sumber listrik pabrik dapat mengubah emisi produksi secara besar. Hasil satu kajian LCA tidak dapat langsung diterapkan ke semua pabrik karena bauran energi, rute kimia, ukuran baterai, masa pakai, jarak tempuh, dan alokasi produk samping berbeda.

Kajian daur hidup yang relevan membandingkan kendaraan dengan fungsi sepadan, misalnya jarak total, kapasitas muatan, dan kelas kendaraan. Apabila NMC memungkinkan kendaraan memakai baterai lebih kecil untuk jarak yang sama, perbedaan emisi bahan dapat mengecil. Sebaliknya, apabila kendaraan LFP memiliki umur lebih panjang dan komponen dapat diperbaiki, emisi produksi dapat tersebar pada layanan yang lebih banyak. Penggunaan energi juga menentukan hasil: kendaraan yang lebih berat dapat memakai listrik lebih besar selama masa pakai. Paul dan kolega (2024) menekankan bahwa perbandingan LCA baterai masih dipengaruhi keterbatasan data, variasi metodologi, dan ketidakpastian biaya serta dampak sosial.

LCA membantu membuat asumsi terlihat, tetapi tidak menggantikan pengukuran lokal. Dampak pada air, biodiversitas, kesehatan pekerja, atau penggunaan lahan mungkin sulit diringkas dalam indikator emisi karbon. Pabrik berenergi rendah karbon dapat tetap menghadapi persoalan tata air atau residu. Sebaliknya, risiko material yang berharga tinggi dapat dikelola baik jika pengawasan dan pemulihan efektif. Perusahaan sebaiknya mengungkapkan data fasilitas dan metodologi, sementara pemerintah memastikan baseline serta audit. Konsumen

dapat meminta informasi asal bahan, tetapi tanggung jawab utama memastikan rantai pasok yang bersih tidak boleh dibebankan kepada konsumen individual saja.

15. Penambangan, air, dan konteks nikel Indonesia

Perbandingan LFP dengan baterai berbasis nikel juga terkait bentuk kegiatan ekstraksi dan pemrosesan bahan. Indonesia merupakan pemain utama nikel global dan berinvestasi besar dalam smelter serta fasilitas bahan baterai. Sektor ini membuka peluang kerja dan pengolahan domestik, tetapi menimbulkan tantangan emisi, air, residu, kesehatan kerja, penggunaan lahan, dan dampak terhadap komunitas. Kajian Wahyono dan kolega (2024) menguji jejak iklim dan kelangkaan air pada produksi ferronikel Indonesia dengan beberapa skenario pembangkit, menunjukkan bahwa teknologi energi yang digunakan memengaruhi intensitas dampak.

LFP mengurangi kebutuhan nikel pada katoda kendaraan yang memakai kimia tersebut, namun tidak otomatis menghapus permintaan nikel pada baja tahan karat, paduan, dan aplikasi lain. Bagi kebijakan industri Indonesia, perubahan bauran baterai bukan hanya risiko atas penjualan mineral; ini juga sinyal untuk mengevaluasi bentuk nilai tambah. Apakah manfaat investasi datang dari ekspor produk antara, katoda, sel, paket, kendaraan, atau layanan teknis? Berapa banyak teknologi dan keterampilan yang tertinggal di dalam negeri? Jawaban itu lebih penting bagi pembangunan jangka panjang daripada sekadar menghitung tonase nikel yang berpotensi masuk ke baterai EV.

Rantai pasok nikel perlu menerapkan tata kelola yang dapat diverifikasi. Pengadaan listrik yang lebih bersih, pemantauan kualitas air, pengendalian limpasan dan residu, rencana penutupan, keselamatan pekerja, serta proses konsultasi komunitas perlu menjadi bagian dari keputusan investasi. LFP memberi perusahaan kendaraan jalur diversifikasi, tetapi pelanggan global tetap akan menilai risiko dan emisi dari semua bahan, termasuk besi, fosfat, litium, grafit, dan aluminium. Indonesia dapat mengubah kekuatan mineral menjadi

reputasi manufaktur hanya jika data dampak terbuka, standar diterapkan konsisten, dan masyarakat memperoleh ruang untuk menyampaikan keberatan serta melihat tindak lanjutnya.

16. Daur ulang dan keekonomian material

NMC dan NCA mengandung nikel serta kobalt yang bernilai dalam proses pemulihan, sehingga pendapatan bahan sekunder dapat membantu menopang biaya daur ulang. LFP tidak mengandung logam bernilai tinggi tersebut di katoda, sehingga keekonomian daur ulang yang berfokus pada kobalt dan nikel kurang menguntungkan. Namun, hal ini tidak berarti LFP tidak dapat didaur ulang. Litium, tembaga, aluminium, grafit, dan komponen lain tetap dapat dipulihkan, dan nilai lingkungan maupun kepatuhan regulasi dapat mendukung pemrosesan meski margin material lebih rendah.

Picatoste dan kolega (2024) membandingkan circularity dan dampak daur hidup baterai NMC dan LFP dengan rute pirometalurgi dan hidrometalurgi. Dalam model yang mereka gunakan, NMC menunjukkan skor sirkularitas lebih tinggi, terutama karena rasio pemulihan material yang lebih baik; masa pakai LFP yang lebih panjang tidak cukup untuk mengimbangi semua indikator yang diuji. Temuan tersebut tidak berarti NMC selalu lebih baik secara lingkungan. Hasilnya terbatas pada asumsi, rute daur ulang, inventori data, dan indikator kajian, serta menunjukkan bahwa nilai bahan yang dapat dipulihkan dan metode pengolahan sangat menentukan hasil.

Regulasi dapat membantu mengatasi kesenjangan insentif. Tanggung jawab produsen, target pemulihan litium, desain untuk pembongkaran, paspor baterai, skema pengumpulan, dan standar pengangkutan dapat memastikan baterai tidak dibuang secara informal. Untuk LFP, proses daur ulang perlu menekan biaya, meningkatkan pemulihan litium dan grafit, dan mengembangkan pasar yang stabil bagi material hasil pemulihan. Bagi produsen NMC, pemulihan nikel dan kobalt perlu dilakukan dengan standar emisi serta keselamatan yang ketat. Ekonomi sirkular tidak hanya tentang memaksimalkan jumlah logam yang

diklaim pulih, tetapi juga memastikan kualitas produk sekunder, perlindungan pekerja, dan manfaat bersih yang terukur.

17. Penggunaan ulang baterai dan akhir masa pakai

Baterai yang kapasitasnya turun di bawah kebutuhan kendaraan dapat masih cocok untuk penyimpanan stasioner, cadangan listrik, atau aplikasi berdaya rendah. Penggunaan ulang dapat memperpanjang layanan material, tetapi keputusan harus mempertimbangkan pemeriksaan kesehatan, keseimbangan sel, riwayat kerusakan, biaya pemindahan, sistem kendali baru, dan standar keselamatan. Sel dengan kimia sama pun bisa memiliki kondisi sangat berbeda setelah digunakan. Pemilik kendaraan perlu mengetahui apakah garansi mengatur baterai bekas dan siapa yang bertanggung jawab jika terjadi kegagalan setelah paket dipindahkan ke aplikasi lain.

LFP sering dipandang menarik untuk penggunaan kedua karena masa siklusnya dapat panjang. Namun, perbandingan penggunaan kedua harus melihat energi yang bisa diberikan selama masa pakai, bukan sekadar jumlah tahun potensial. NMC dengan kapasitas lebih besar atau nilai pemulihan lebih tinggi dapat menjadi pilihan lebih efisien dalam situasi tertentu. Picatoste et al. (2024) menekankan bahwa memperpanjang umur, meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan rasio pemulihan semuanya perlu dioptimalkan bersamaan. Penggunaan ulang tidak otomatis mengurangi dampak; jika pengujian, transportasi, atau sistem tambahan menghabiskan energi dan biaya besar, daur ulang langsung mungkin lebih baik.

Indonesia dapat mengembangkan ekosistem diagnosis baterai, sertifikasi kondisi bekas, sistem pemantauan stasioner, dan fasilitas pengolahan bahan. Bisnis perlu menetapkan standar minimum keamanan, pemilik sah data baterai, prosedur pemisahan sel cacat, dan asuransi tanggung jawab. Pemerintah perlu memastikan baterai bekas lintas pulau tidak diperdagangkan tanpa deklarasi kondisi serta dokumen material. Model bisnis yang menghubungkan produsen kendaraan, operator energi, pembiaya, dan pendaur ulang dapat memberikan

kepastian volume dan tanggung jawab. Dengan mekanisme tersebut, keunggulan umur LFP dapat dikonversi menjadi manfaat layanan berlapis, bukan sekadar klaim pemasaran tentang baterai tahan lama.

18. Perkembangan pasar baterai EV

Data pasar mengubah perdebatan dari kemungkinan teknologi menjadi persaingan yang telah berlangsung. IEA melaporkan LFP menyumbang hampir separuh baterai EV yang terpasang secara global pada 2024, lalu melewati 55% pada 2025. Pertumbuhan banyak dipimpin China dan meluas ke sejumlah pasar berkembang. Pada 2025, LFP menjadi jenis baterai dominan untuk banyak EV di negara berkembang dan pasar kendaraan ekonomis. Pada saat yang sama, di luar China, hampir 80% baterai EV yang digunakan pada 2025 masih memakai kimia yang mengandung nikel. Perbedaan wilayah ini menunjukkan bahwa struktur pasar dan kebijakan perdagangan memengaruhi pilihan kimia (IEA, 2025, 2026).

Pasar LFP tidak tumbuh hanya karena biaya bahan katoda. Produsen China memiliki skala produksi, jaringan pemasok, kemampuan rekayasa, dan pengalaman manufaktur yang memperkuat daya saing. Perusahaan kendaraan di Amerika Utara dan Eropa semakin memasukkan LFP untuk model pasar massal, sementara tetap menggunakan NMC/NCA untuk varian performa dan jarak jauh. Perusahaan baterai juga mengumumkan fasilitas LFP di berbagai kawasan. Keputusan tersebut mengubah perencanaan pabrik, perjanjian pasokan, investasi bahan baku, dan proyek pengolahan nikel. Kapasitas yang diumumkan belum sama dengan kapasitas yang benar-benar beroperasi atau menghasilkan sel dengan mutu tinggi.

Pangsa pasar harus didefinisikan secara cermat. Pangsa berdasarkan jumlah kendaraan dapat berbeda dari pangsa berdasarkan GWh karena ukuran baterai tiap jenis kendaraan berbeda. Data mobil penumpang tidak selalu mencerminkan bus, truk, sepeda motor, atau penyimpanan jaringan. IEA juga mengecualikan kendaraan roda dua dan tiga dalam beberapa angka EV baterainya. Pembaca sebaiknya melihat metode dan periode data sebelum membuat kesimpulan.

Perubahan cepat pada kebijakan, insentif, harga litium dan nikel, strategi perusahaan, serta tarif dapat mengubah proyeksi. Laporan ini menyebutkan data terbaru, tetapi tidak menganggap satu tahun pangsa kimia sebagai ramalan dominasi jangka panjang.

19. Geopolitik dan konsentrasi rantai pasok

LFP menurunkan ketergantungan terhadap nikel dan kobalt, tetapi rantai pasoknya sendiri terkonsentrasi. Manufaktur sel, produksi katoda LFP, pemrosesan litium, dan pembuatan grafit didominasi oleh beberapa negara serta perusahaan. IEA menggarisbawahi bahwa di luar China, pasokan LFP masih sangat bergantung pada China, walaupun kapasitas baru mulai dibangun di negara lain. Sementara itu, nikel terutama berasal dari Indonesia dan diolah melalui jaringan regional yang menghubungkan Indonesia dengan China dan produsen lain. Dengan demikian, memilih LFP mengalihkan jenis risiko pasokan, bukan menghilangkan risiko ketergantungan.

Diversifikasi bukan sekadar membuat satu pabrik baru di negara lain. Ketahanan memerlukan pemasok material aktif, prekursor, bahan kimia, peralatan produksi, teknisi, sistem mutu, paten atau lisensi yang dapat digunakan, serta pembeli yang memadai. Jika fasilitas bergantung pada impor hampir seluruh bahan dan teknologi, gangguan logistik tetap dapat menghentikan produksi. Negara juga perlu menguji apakah pasokan dapat diganti tanpa perubahan besar pada desain kendaraan. Standardisasi tertentu pada format paket dan konektor dapat membantu, meski persaingan antar-perusahaan masih memberi insentif terhadap desain proprietary.

Perusahaan dan pemerintah dapat menyiapkan strategi ganda untuk mengurangi konsentrasi: kontrak dari beberapa kawasan, pengembangan pemasok alternatif, stok penyangga yang proporsional, daur ulang domestik, dan pengujian sumber bahan baru. Strategi itu harus mempertimbangkan biaya serta dampak sosial di setiap lokasi. Ketika satu sumber litium atau grafit terhambat, pasokan LFP dapat terpapar; ketika regulasi atau harga nikel berubah, NMC/NCA

terkena dampak. Analisis risiko perlu menilai substitusi, waktu pemulihan pasokan, dan biaya berpindah sumber, bukan hanya menghitung jumlah pemasok yang tercantum dalam laporan tahunan.

20. Apa arti perubahan kimia bagi industri nikel Indonesia

Indonesia memiliki modal mineral nikel, kemampuan pertambangan yang berkembang, serta investasi pengolahan besar; negara ini juga merupakan pemasok bijih nikel penting untuk baterai NMC (IEA, 2025). Prospek tersebut tidak otomatis sama dengan dominasi pasar baterai, karena bijih harus diproses menjadi bahan dengan kemurnian dan spesifikasi yang sesuai untuk prekursor serta katoda. Rantai nilai baterai juga membutuhkan teknik kimia, produksi bahan aktif, anoda, separator, elektrolit, sel, paket, perangkat lunak, uji mutu, dan pengelolaan akhir masa pakai. Jika LFP tumbuh, proyek yang bergantung eksklusif pada permintaan NMC perlu menguji sensitivitas terhadap variasi bauran kimia dan utilisasi pabrik.

Perubahan pasar memberi alasan untuk memperkuat ketahanan portofolio nasional. Pengembangan produk nikel berkualitas tinggi tetap relevan bagi NMC dan NCA yang memerlukan energi tinggi. Pada waktu yang sama, industri perlu mengembangkan kapabilitas LFP, termasuk bahan aktif, proses sintesis, pengolahan limbah, desain paket, daur ulang, serta pengujian kendaraan. Diversifikasi tidak berarti mengabaikan sumber daya lokal, tetapi memperluas keahlian industri agar tidak bergantung pada satu bahan atau satu pelanggan. Kolaborasi universitas dan perusahaan dapat menghubungkan riset dengan masalah proses, rendemen, kestabilan, keselamatan, dan biaya yang dihadapi lini produksi.

Keberhasilan hilirisasi harus dinilai melalui produktivitas, keterampilan domestik, hubungan pemasok lokal, transfer teknologi, mutu produk, dan ketahanan terhadap siklus harga. Mengumumkan nilai investasi atau kapasitas terpasang tidak menunjukkan seberapa sering mesin berjalan, seberapa banyak produk memenuhi spesifikasi, ataupun seberapa besar pengetahuan lokal bertambah.

Perusahaan perlu melaporkan kapasitas nominal, produksi aktual, tingkat utilisasi, yield, pelanggan, asal bahan kimia, dan dampak lingkungan. Jika produksi LFP di Indonesia bergantung pada teknologi asing, penilaian perlu menanyakan mekanisme pembelajaran dan peningkatan kapabilitas. Hal yang sama berlaku bagi proyek NMC dan pengolahan nikel.

21. Kebijakan industri yang tidak bertaruh pada satu kimia

Pemerintah dapat membuat kerangka kebijakan yang netral terhadap teknologi namun ketat terhadap kinerja. Dukungan diberikan pada proyek yang memenuhi tolok ukur keselamatan, emisi, keterlacakan, produktivitas, pembelajaran lokal, dan manfaat ekonomi; dukungan tidak dikaitkan hanya pada satu label kimia. Pendekatan ini mengurangi risiko ketika pangsa pasar bergeser. Insentif dapat mendorong efisiensi energi pabrik, pemanfaatan energi rendah karbon, pengembangan laboratorium uji, pelatihan tenaga kerja, dan penelitian yang diadopsi perusahaan. Pengadaan kendaraan pemerintah dapat meminta bukti biaya daur hidup, keselamatan, dan dukungan purnajual tanpa menetapkan kimia tertentu kecuali ada alasan teknis.

Kebijakan harus membedakan kegiatan yang memang memerlukan nikel dari kegiatan yang tidak. Proyek pertambangan dan smelter baru perlu diuji terhadap pasokan pasar, kapasitas pengawasan, dampak lingkungan, dan manfaat lokal. Dukungan terhadap ekosistem LFP sebaiknya tidak mengandalkan dugaan bahwa seluruh mineralnya tersedia di dalam negeri; pemetaan rantai pasok harus membedakan bahan lokal, impor, serta bagian teknologi yang dikuasai. Peta jalan yang baik memperbarui asumsi dengan data penjualan EV, permintaan berdasarkan kimia, dan kapasitas pabrik yang beroperasi. Pembentukan kebijakan yang fleksibel lebih bijaksana daripada mengejar target kapasitas yang tidak diuji pasar.

Regulasi produsen dapat mendorong desain yang mudah dibongkar, standar pelabelan, kewajiban pengumpulan, dan pelaporan dampak. Standar kualitas baterai bekas akan mendukung penggunaan ulang yang aman; standar

transportasi dan penyimpanan mencegah baterai rusak menimbulkan kebakaran. Untuk mineral, standar pengungkapan dan audit perlu memuat lokasi fasilitas, bauran listrik, air, residu, keselamatan pekerja, serta konsultasi komunitas. Kebijakan pembelian pemerintah, pembiayaan publik, dan insentif fiskal dapat mengaitkan manfaat dukungan dengan indikator yang dapat diverifikasi. Program perlu dievaluasi berkala agar subsidi tidak terus memperkuat kapasitas yang secara teknis atau ekonomis sudah tidak kompetitif.

22. Pilihan untuk produsen kendaraan dan pembuat baterai

Produsen kendaraan sebaiknya mendesain platform dengan strategi portofolio. Model kompak dan kendaraan kota dapat memanfaatkan LFP jika kebutuhan jarak, massa, ruang, dan biaya cocok. Model jarak jauh, kendaraan niaga, atau varian berperforma tinggi dapat memakai NMC/NCA jika energi spesifik memberi manfaat pada tingkat kendaraan. Perusahaan perlu menguji kimia bersama bentuk sel, arsitektur paket, dan sistem pendingin. Menawarkan beberapa versi memungkinkan pelanggan membayar fitur jarak jauh hanya ketika fitur itu benar-benar dibutuhkan, sementara platform dasar tetap dapat dijangkau lebih banyak orang.

Produsen sel perlu berinvestasi pada kualitas dan konsistensi, bukan semata-mata kapasitas. Pengendalian kelembapan, kemurnian material, coating elektroda, pembentukan sel, dan inspeksi menentukan keamanan serta yield. Perbedaan performa antarkelompok produksi dapat mengurangi kepercayaan pasar dan menaikkan biaya garansi. Laboratorium harus menguji sel dan paket dalam kombinasi penggunaan tropis, termasuk arus tinggi, parkir panas, pengisian cepat, getaran, dan paparan air. Kolaborasi OEM dengan pemasok katoda, sistem manajemen, dan pendaur ulang sejak fase desain mencegah masalah akhir umur muncul setelah produksi massal.

Pabrikan juga harus menghindari klaim promosi yang mencampur hasil laboratorium dan penggunaan normal. Pernyataan seperti “aman”, “umur sangat panjang”, atau “bebas bahan kritis” perlu disertai definisi dan kondisi. LFP tidak

menggunakan nikel dan kobalt pada katoda, tetapi tetap memakai litium, grafit, dan bahan lain. NMC/NCA tidak otomatis lebih cepat rusak atau lebih berbahaya jika desain dan kontrolnya tepat. Komunikasi spesifikasi yang transparan membantu dealer dan pelanggan membandingkan produk dengan akal sehat. Perusahaan yang memberi batas garansi dan panduan pengisian yang jelas mengurangi kesalahpahaman serta meningkatkan kepercayaan purnajual.

23. Kerangka keputusan bagi konsumen

Konsumen dapat memulai dengan mencatat jarak harian, perjalanan terjauh per bulan, jumlah penumpang, kondisi jalan, akses pengisian di rumah, frekuensi perjalanan antarkota, dan waktu tunggu yang dapat diterima. Setelah itu, calon pembeli mengidentifikasi kriteria yang membatasi pilihan. Apakah ruang parkir dan tarif menjadi masalah? Apakah mobil harus menempuh rute tanpa stasiun cepat? Apakah harga awal atau jarak maksimum lebih penting? Pertanyaan ini menunjukkan apakah kapasitas paket LFP cukup atau energi tinggi dari NMC/NCA akan memberi manfaat nyata.

Perbandingan biaya hendaknya memakai angka yang bisa ditelusuri: harga kendaraan, jarak tempuh realistis, konsumsi kWh per 100 kilometer, biaya pengisian, garansi, biaya penggantian komponen, serta estimasi nilai jual. Calon pemilik dapat meminta uji jalan dan memeriksa performa AC, penurunan jarak di jalan tol, serta kurva pengisian. Pengisian cepat maksimum tidak sama dengan kecepatan rata-rata sepanjang sesi. Jika pilihan tersedia, uji rute yang paling sering dijalani. Informasi pemilik dan teknisi independen dapat melengkapi data resmi, tetapi tetap perlu dipisahkan dari pengalaman yang tidak mewakili seluruh unit.

Ketika spesifikasi dua kendaraan berbeda, pembeli perlu membandingkan ukuran dan keselamatan secara setara. Kendaraan lebih besar mungkin memiliki paket NMC lebih besar karena massa dan konsumsi kendaraan, sehingga tidak adil membandingkan hanya kimia baterai. Garansi harus menyatakan ambang kapasitas, lamanya perlindungan, batas jarak, serta pengecualian. Pemilik perlu

mengetahui tempat layanan, biaya pemeriksaan, dan ketersediaan baterai pengganti. Pilihan kimia akhirnya berkaitan dengan gaya hidup dan toleransi risiko; pembelian yang rasional tidak harus memakai kimia dengan angka paling tinggi, tetapi yang memberikan layanan cukup sepanjang umur kendaraan.

24. Kerangka keputusan bagi armada dan organisasi

Operator armada dapat melakukan pemetaan operasional sebelum tender. Data telematika menunjukkan perjalanan harian, waktu berhenti, konsumsi energi, berat muatan, jalan menanjak, penggunaan AC, dan peluang pengisian. Kendaraan dengan pola kembali ke depo mungkin dapat menggunakan LFP dengan pengisian lambat terjadwal. Rute panjang dengan waktu pengisian terbatas dapat memberi nilai bagi kimia berenergi tinggi. Uji coba sebaiknya meliputi periode musiman yang cukup dan beberapa konfigurasi kendaraan untuk menghindari keputusan dari satu unit atau rute yang tidak mewakili keseluruhan armada.

Organisasi kemudian membandingkan total biaya melalui horizon kontrak. Biaya mencakup kendaraan, charger, penguatan jaringan, puncak daya, energi, pembiayaan, pemeliharaan, downtime, pelatihan, asuransi, penggantian baterai, dan nilai akhir. Risiko pasokan dan layanan perlu dimasukkan dalam kontrak: keterlambatan suku cadang, degradasi lebih cepat, perubahan perangkat lunak, pemilik baterai bekas, dan kemampuan perbaikan setelah kecelakaan. Pemasok harus memberikan data uji dan transparansi garansi. Perjanjian yang menghubungkan pembayaran dengan kinerja kendaraan dapat membagi risiko lebih adil.

Armada juga perlu menetapkan metrik setelah kendaraan beroperasi. Contohnya adalah energi per kilometer, kendaraan siap jalan, frekuensi pengisian, waktu di luar layanan, penurunan kapasitas, dan kejadian keselamatan. Jika LFP dipilih karena umur siklus, data pemakaian perlu membuktikan manfaat tersebut. Jika NMC dipilih karena bobot ringan, manfaat harus terlihat pada muatan, efisiensi, atau produktivitas rute. Pengendalian ini mencegah organisasi membeli

teknologi berdasarkan brosur. Penilaian pascaproyek dapat menjadi basis pembelajaran yang dibagikan kepada unit lain dan memperbaiki kebijakan kendaraan beremisi rendah.

25. Pembiayaan dan risiko investasi

Pabrik bahan aktif atau sel memiliki masa pembangunan dan umur aset yang panjang, sedangkan pilihan kimia dapat berubah lebih cepat. Investor perlu menguji skenario pertumbuhan LFP, NMC/NCA, baterai sodium-ion, dan efisiensi material. Harga nikel, kobalt, litium, listrik, dan bahan kimia perlu diuji dalam kombinasi; hubungan antarvariabel lebih penting daripada satu harga dasar. Jika pabrik dibangun hanya untuk satu pelanggan atau satu kimia, risiko kehilangan permintaan meningkat. Kontrak pembelian jangka panjang dapat mengurangi ketidakpastian, tetapi juga dapat mengikat pembeli pada produk yang tidak lagi kompetitif.

Pembiayaan bertahap dapat menjaga pilihan tetap terbuka. Perusahaan bisa memulai dengan kapasitas yang didukung kontrak nyata, membuktikan tingkat hasil produksi, menuntaskan izin lingkungan, dan membangun kemampuan pemasok sebelum ekspansi besar. Pembayaran berbasis tonggak dan persyaratan kinerja menjaga disiplin modal. Uji tekanan perlu memeriksa penurunan harga produk, biaya mitigasi yang meningkat, perubahan pangsa kimia, keterlambatan teknologi, dan biaya penutupan. Bagi bank, aset, hak teknologi, akses bahan, pelanggan, dan izin perlu dinilai bersama, bukan hanya melihat nilai cadangan mineral di bawah tanah.

Investor dapat meminta pelaporan materialitas yang menghubungkan risiko dengan keputusan. Perusahaan perlu mengidentifikasi titik harga impas, tingkat utilisasi minimum, intensitas emisi maksimum yang diterima pasar, dan ambang dampak lingkungan yang memicu penghentian operasi. Komite risiko harus memahami apakah perusahaan memiliki akses terhadap desain alternatif dan teknologi daur ulang. Analisis ini bukan alasan menolak seluruh proyek nikel; analisis menunjukkan syarat agar investasi tahan menghadapi perubahan bauran

kimia dan standar lingkungan. Modal yang disiplin lebih berpeluang menghasilkan manfaat jangka panjang dibandingkan ekspansi yang didasarkan pada proyeksi optimistis tunggal.

26. Pendidikan, tenaga kerja, dan kemampuan teknologi

Peralihan kimia memerlukan tenaga kerja yang mampu bekerja lintas disiplin: kimia material, teknik proses, listrik, perangkat lunak, keselamatan, data, dan daur ulang. Operator pabrik perlu memahami mutu prekursor, kebersihan ruang produksi, kendali suhu, serta cara menganalisis cacat sel. Teknisi kendaraan perlu belajar diagnosis baterai dan keselamatan tegangan tinggi. Pegawai pemerintah dan lembaga pengadaan perlu memahami cara membaca kurva pengisian, data garansi, dan penilaian daur hidup. Kurikulum vokasi dapat menggabungkan praktik laboratorium dengan pemecahan masalah di pabrik dan armada.

Perguruan tinggi dapat memperkuat riset yang menjawab persoalan industri Indonesia. Topiknya mencakup sintesis katoda LFP dan material kaya nikel, pemanfaatan limbah, sistem manajemen baterai untuk kondisi tropis, ketahanan paket terhadap air dan panas, analisis degradasi, dan proses daur ulang dengan emisi rendah. Pengujian perlu dilaporkan secara terbuka dengan protokol yang dapat direplikasi. Kemitraan dengan perusahaan harus menjaga kebebasan akademik sekaligus menghormati data bisnis. Hasil riset yang dapat ditransfer ke lini produksi akan membantu meningkatkan produktivitas, bukan hanya jumlah publikasi atau paten.

Pemerintah daerah di kawasan industri perlu menyiapkan pelatihan, infrastruktur, layanan dasar, serta konsultasi masyarakat. Pertumbuhan industri dapat menimbulkan tekanan perumahan, air, kesehatan, lalu lintas, dan pendidikan. Pelatihan ulang penting jika satu fasilitas menutup atau beralih produk. Strategi tenaga kerja harus dimulai sejak awal proyek, bukan setelah penurunan pasar terjadi. Sertifikasi keselamatan dan kompetensi teknis dapat menghubungkan pekerja ke banyak jenis fasilitas, sehingga mereka tidak tergantung pada satu

perusahaan. Transisi yang adil membantu mengurangi konflik dan menjaga dukungan sosial terhadap perubahan teknologi.

27. Batas data dan cara membaca klaim

Banyak angka perbandingan berasal dari kombinasi uji lab, data produsen, kajian komputasi, dan analisis pasar. Hasil dapat berubah karena sel yang dibandingkan berbeda kapasitas, usia, suhu uji, kadar state of charge, atau kecepatan arus. Persentase pangsa pasar baterai juga dapat memakai basis jumlah kendaraan atau kapasitas GWh. Angka biaya dapat mencampurkan segmen kendaraan dan penyimpanan. Pembaca perlu memeriksa apa yang berada dalam pembilang dan penyebut, apa fungsi yang disamakan, serta apakah data baru atau sekadar proyeksi.

Klaim keselamatan “LFP tidak bisa terbakar” tidak didukung oleh sifat kimia. Klaim “NMC selalu lebih pendek umur” juga terlalu luas. Penelitian usia sel komersial memperlihatkan hasil yang bergantung pada protokol dan rancangan sel. Klaim “LFP ramah lingkungan” sebaiknya menjelaskan kategori dampak, lokasi pengolahan, listrik, air, penggunaan lahan, dan akhir masa pakai. Kajian Picatoste et al. (2024) bahkan menunjukkan hasil yang berbeda antara emisi, deplesi mineral, dan indeks sirkularitas. Satu indikator tidak mewakili keseluruhan keberlanjutan.

Laporan yang baik memisahkan fakta, interpretasi, dan rekomendasi. Fakta seperti volume pemasangan baterai dapat dilaporkan oleh lembaga data; interpretasi menjelaskan alasan LFP tumbuh; rekomendasi memberi arahan kebijakan berdasarkan risiko. Penulis sebaiknya menulis rentang ketidakpastian dan menyebutkan bahwa pasar berubah. Produsen, investor, pemerintah, serta konsumen dapat memakai skenario tinggi, moderat, dan rendah untuk menguji keputusan. Transparansi metode membuat pihak lain dapat mengulangi analisis dan mengidentifikasi asumsi yang perlu diperbaiki. Kebiasaan itu lebih bernilai daripada satu angka presisi palsu yang hanya menguatkan harapan awal.

28. Peluang penelitian untuk Indonesia

Agenda penelitian Indonesia dapat membandingkan baterai LFP dan NMC/NCA dalam kendaraan yang benar-benar digunakan di iklim tropis. Uji lapangan perlu mengukur konsumsi energi, perubahan kapasitas, kebutuhan pendinginan, performa setelah pengisian cepat, ketahanan terhadap genangan, serta biaya per kilometer. Studi tersebut harus memilih kendaraan dengan ukuran dan pola penggunaan yang sebanding. Data dapat mengisi kekosongan antara angka laboratorium dan laporan pemasaran. Publikasi protokol akan memungkinkan universitas dan lembaga uji menggabungkan hasil dari beberapa kota dan tipe armada.

Penelitian kedua berkaitan dengan rantai pasok dan ekonomi lokal. Analisis input-output, analisis daur hidup, serta wawancara pemangku kepentingan dapat menilai bagaimana pergeseran LFP memengaruhi pekerja, pemasok, wilayah tambang, smelter, pabrik bahan aktif, dan lembaga daur ulang. Model skenario perlu menguji perubahan permintaan NMC, LFP, dan penyimpanan jaringan. Penelitian tidak seharusnya menganggap setiap mineral dalam baterai tersedia di Indonesia; ketersediaan geologis, kualitas, biaya pemurnian, teknologi, izin, dan dampak harus dibedakan. Hasil penelitian dapat membantu pemerintah membangun strategi yang tidak bertumpu pada satu jalur ekspor.

Bidang ketiga adalah desain dan penggunaan akhir baterai. Penelitian dapat menguji apakah penggunaan ulang menguntungkan dalam konteks tarif listrik, pola beban, biaya pemeriksaan dan logistik di Indonesia. Daur ulang perlu menilai kemampuan mengambil litium serta grafit dari LFP secara ekonomis, disertai keselamatan pekerja dan pengolahan residu. Model tata kelola dapat merancang tanggung jawab produsen, paspor baterai, dan sistem pengumpulan yang sesuai kondisi kepulauan. Perguruan tinggi dapat membentuk konsorsium uji sehingga data baterai domestik tidak hanya berasal dari spesifikasi pemasok asing. Pengetahuan seperti ini menjadi infrastruktur strategis untuk pembelajaran industri.

29. Skenario teknologi dan prospek masa depan

Dalam skenario LFP menguasai pangsa besar kendaraan massal, permintaan nikel untuk baterai per kendaraan dapat turun meskipun penjualan EV tumbuh. Dalam skenario kedua, kendaraan jarak jauh, niaga, dan pasar beriklim ekstrem mempertahankan permintaan NMC/NCA. Skenario ketiga menggabungkan LFP untuk kendaraan kompak dan penyimpanan dengan kimia kaya nikel untuk kendaraan berenergi tinggi, sementara sodium-ion atau solid-state masuk pada aplikasi tertentu ketika mencapai kinerja dan biaya komersial. Skenario bukan ramalan; ia membantu menguji ketahanan kebijakan dan keputusan investasi terhadap berbagai jalur masuk akal.

Perbaikan LFP dapat mempersempit kesenjangan energi melalui material, pemadatan, desain elektroda, elektrolit, dan struktur paket. Perbaikan NMC/NCA dapat mengurangi kobalt, meningkatkan stabilitas, serta memperpanjang umur. Teknologi daur ulang dapat mengubah ekonomi material sekunder. Sistem pengisian cepat, manajemen termal, dan pengendalian berbasis data juga dapat mengubah nilai relatif setiap kimia. Perubahan besar jarang berasal dari satu terobosan; biasanya timbul dari akumulasi peningkatan produksi, desain, dan perangkat lunak. Oleh sebab itu, penilaian prospek harus memantau bukan hanya komposisi katoda saat ini, melainkan keseluruhan ekosistem inovasi.

Di Indonesia, kemampuan untuk mengubah produk dan proses akan menentukan daya tahan industri. Pabrik nikel perlu meningkatkan efisiensi dan kredibilitas lingkungan; pembuat baterai perlu menguasai mutu dan performa; lembaga riset harus menyediakan pengujian yang dipercaya pasar; dan pemerintah perlu mengatur dengan konsistensi. Jika dunia beralih lebih banyak ke LFP, Indonesia tetap dapat berperan sebagai produsen bahan, sel, paket, kendaraan, sistem energi, atau layanan pemulihan. Jika pasar nikel tetap kuat pada segmen tertentu, pasokan nikel berkelanjutan menjadi keunggulan. Kedua kemungkinan ini memberi nilai pada fleksibilitas, pembelajaran, dan disiplin investasi.

30. Perbandingan dengan kimia baterai lain

LFP dan baterai kaya nikel bukan satu-satunya pilihan yang tersedia. Sodium-ion dapat mengurangi ketergantungan terhadap litium dan memakai unsur natrium yang melimpah, tetapi energi spesifiknya saat ini umumnya lebih rendah dan pemanfaatan untuk kendaraan jarak jauh masih terbatas. Baterai solid-state berpotensi menawarkan keamanan dan energi yang lebih tinggi, namun proses manufaktur massal, biaya, umur, dan kinerja dunia nyata masih perlu dibuktikan. Baterai aliran dan besi-udara dapat sesuai untuk penyimpanan jaringan berdurasi panjang, tetapi tidak dirancang untuk memenuhi kebutuhan massa dan ruang kendaraan ringan.

Karena itu, pembandingan LFP dan NMC/NCA tetap penting bagi pasar EV saat ini, tetapi tidak boleh mengunci perencanaan masa depan hanya pada dua pilihan. IEA (2026) menyebut sodium-ion, solid-state, lithium-sulfur, iron-air, dan redox-flow sebagai bagian dari lanskap inovasi dengan sasaran aplikasi berbeda. Perusahaan dapat mengikuti teknologi melalui indikator kesiapan, hasil prototipe, biaya produksi, keselamatan, dan ketersediaan fasilitas uji. Pengumuman laboratorium tidak setara dengan produksi massal yang konsisten. LFP dan NMC sendiri memerlukan waktu bertahun-tahun untuk mencapai skala, kualitas, dan jaringan pasokan seperti sekarang.

Perencanaan yang adaptif menghindari dua kesalahan: menganggap kimia saat ini akan bertahan selamanya atau menganggap setiap inovasi baru segera menggantikannya. Pembeli kendaraan dan operator armada membutuhkan produk yang dapat digunakan dan dirawat selama masa kontrak, sehingga keputusan tidak dapat menunggu teknologi yang belum tersedia. Produsen, sebaliknya, dapat mendiversifikasi riset dan menjaga kemampuan berpindah desain. Pemerintah dapat membantu dengan standardisasi uji, pendanaan riset terbuka, dan fasilitas demonstrasi. Dengan kerangka tersebut, LFP dan kimia nikel diperlakukan sebagai pilihan matang untuk kebutuhan berbeda, sambil ruang inovasi tetap terbuka.

31. Perangkat lunak, kendali baterai, dan kualitas data

Kinerja baterai yang dirasakan pengguna banyak ditentukan oleh perangkat lunak dan sistem manajemen. BMS mengestimasi kapasitas, mengatur tegangan, membatasi arus, menyeimbangkan sel, dan melindungi paket ketika temperatur menyimpang. Perkiraan state of charge pada LFP dapat lebih sulit pada bagian tertentu kurva tegangan yang relatif datar, sehingga estimasi memerlukan algoritma, sensor, dan kalibrasi yang baik. NMC juga membutuhkan sistem estimasi dan pengendalian yang akurat, khususnya saat digunakan dekat batas tegangan dan temperatur. Perangkat lunak yang keliru dapat membuat kapasitas yang tersedia terasa lebih kecil atau membiarkan sel beroperasi di luar kondisi ideal.

Produsen sebaiknya menguji algoritma pada kondisi penggunaan nyata dan memperbaruinya secara terkendali. Pembaruan perangkat lunak dapat mengubah batas pengisian, pemanasan, pendinginan, atau estimasi jarak tempuh. Informasi perubahan perlu disampaikan agar konsumen tidak mengira kinerja kendaraan menurun tanpa sebab. Pengguna kendaraan juga harus mengetahui bahwa angka jarak tersisa adalah estimasi yang bergantung pada pola mengemudi, suhu, medan, dan konsumsi aksesori. Fitur over-the-air dapat memperbaiki kendali, tetapi membawa kebutuhan keamanan siber, privasi data, dan mekanisme pemulihan bila pembaruan gagal.

Data kesehatan baterai menjadi dasar bagi garansi, pasar kendaraan bekas, dan penggunaan kedua. Jika format data sepenuhnya tertutup, pembeli independen sulit memeriksa kapasitas aktual dan riwayat pengisian. Standar pelaporan minimal dapat mencakup SoH, kejadian panas, jumlah siklus ekuivalen, kapasitas tersedia, dan riwayat perbaikan, dengan perlindungan privasi pemilik. Data harus dapat diverifikasi dan dikalibrasi agar tidak berubah menjadi klaim pemasaran. Bengkel independen memerlukan akses aman untuk diagnosis. Transparansi teknis memberi nilai pada LFP maupun NMC karena membangun kepercayaan terhadap seluruh sistem EV.

32. Dimensi sosial dan etika dalam keputusan baterai

Setiap pilihan kimia menghubungkan konsumen dengan kegiatan ekstraksi, manufaktur, dan pengelolaan limbah di berbagai wilayah. LFP mengurangi permintaan nikel dan kobalt di katoda, tetapi litium dan grafit memiliki sumber serta risiko sosial-lingkungan sendiri. NMC/NCA mengandalkan nikel dengan pemrosesan yang dapat menghasilkan emisi tinggi jika menggunakan energi fosil. Karena itu, bahasa pemasaran seperti “bersih”, “hijau”, atau “bebas konflik” tidak cukup tanpa bukti. Pengadaan bertanggung jawab menelusuri asal material, kondisi kerja, konsultasi masyarakat, keselamatan fasilitas, dan cara menangani keluhan.

Keadilan transisi juga menyangkut pihak yang memperoleh manfaat dan menanggung beban. Konsumen di kota dapat menikmati udara jalan yang lebih bersih, sementara komunitas di dekat tambang atau pabrik mungkin menghadapi debu, lalu lintas, kebutuhan air, atau perubahan mata pencaharian. Pekerja di fasilitas yang tergantung pada satu komoditas dapat terdampak saat permintaan beralih. Kebijakan perlu menyertakan konsultasi bermakna, perlindungan kesehatan, pelatihan, pemantauan independen, dan pembagian manfaat lokal. Strategi ini berlaku bagi investasi nikel maupun fasilitas pengolahan bahan LFP.

Tanggung jawab produsen harus mencakup masa setelah kendaraan terjual. Pemilik perlu memperoleh informasi tentang perawatan, batas pengisian, jaminan, dan penanganan baterai rusak. Perusahaan perlu menghindari praktik yang membuat paket harus diganti seluruhnya ketika satu modul dapat diperbaiki, kecuali alasan keselamatan membuatnya perlu. Penyedia layanan harus memiliki keterampilan dan alat yang aman. Laporan keberlanjutan sebaiknya menunjukkan kemajuan dan kendala, bukan sekadar janji. Transparansi tersebut membantu publik membedakan manfaat kendaraan listrik dari kualitas tata kelola seluruh rantai pasoknya.

33. Peta jalan praktis untuk keputusan yang tangguh

Dalam jangka pendek, pembeli dan pengelola armada dapat menyusun profil perjalanan, kebutuhan energi, akses pengisian, dan batas biaya. Produsen kendaraan perlu menerbitkan data yang dapat dibandingkan untuk jarak realistis, pengisian cepat, garansi, dan performa suhu. Pemerintah dapat menyusun panduan pengadaan yang menilai biaya daur hidup serta keselamatan. Pada saat bersamaan, pengawasan lingkungan di sektor nikel dan sistem pengumpulan baterai harus diperkuat. Langkah ini membuat keputusan hari ini didasarkan pada data yang dapat diuji, sambil mengurangi risiko aset yang salah spesifikasi.

Dalam jangka menengah, Indonesia dapat mengembangkan laboratorium uji baterai, sertifikasi teknisi, produksi bahan aktif yang kompetitif, sistem daur ulang, dan penelitian penggunaan kedua. Pelaku industri dapat membangun kontrak yang membuka ruang penyesuaian volume dan produk ketika permintaan berubah. Pemerintah perlu menghubungkan investasi dengan tenaga kerja lokal, pemasok domestik, transfer kemampuan, serta target emisi dan air yang terukur. Dukungan terhadap LFP dan NMC sebaiknya dinilai berdasarkan hasil industri, bukan jumlah proyek yang diumumkan. Pembelajaran proses akan menjadi pengaman ketika satu teknologi mengalami tekanan pasar.

Dalam jangka panjang, evaluasi kebijakan dan investasi perlu mengikuti beberapa indikator: komposisi kimia per segmen, biaya kendaraan, intensitas energi dan emisi pabrik, utilisasi kapasitas, kualitas sel, keselamatan, tingkat pengumpulan, serta jumlah bahan yang dipulihkan. Data sebaiknya diperbarui secara berkala dan dapat diaudit. Ketika indikator menyimpang dari sasaran, rencana perlu diubah. Pendekatan ini memungkinkan Indonesia tetap meraih nilai dari sumber daya nikel sambil memperoleh keahlian di bidang LFP dan teknologi lain. Fleksibilitas bukan penundaan keputusan; ia merupakan cara mengunci investasi bertahap berdasarkan bukti yang makin kuat.

34. Kesimpulan

LFP memiliki sejumlah keunggulan yang jelas dibandingkan baterai berbasis nikel. Katodanya tidak memakai nikel dan kobalt, biaya materialnya dapat lebih rendah, kestabilan termalnya relatif baik, dan baterai dapat memiliki umur siklus panjang pada penggunaan yang sesuai. Kombinasi tersebut membuat LFP menarik untuk kendaraan pasar massal, armada dengan rute terencana, dan penyimpanan energi. Pertumbuhan pangsa LFP yang melampaui separuh pemasangan baterai EV global pada 2025 menunjukkan bahwa teknologi ini bukan lagi pilihan pinggiran. Pengaruhnya mulai mengubah strategi produsen dan proyeksi pasokan mineral.

Namun, LFP tidak unggul dalam semua dimensi. Kepadatan energi sel umumnya lebih rendah daripada NMC/NCA, sehingga kendaraan dengan ruang terbatas atau tuntutan jarak dan muatan tinggi dapat lebih cocok memakai kimia kaya nikel. LFP juga dapat menghadapi keterbatasan performa saat dingin dan tantangan keekonomian daur ulang akibat rendahnya kandungan logam bernilai tinggi. Keamanan tidak otomatis karena semua baterai memerlukan pengelolaan panas, perlindungan listrik, sistem kendali, dan prosedur layanan. Dampak lingkungan juga tetap bergantung pada sumber bahan, listrik produksi, lama pemakaian, dan pengelolaan akhir masa pakai.

Strategi yang paling rasional bukan menetapkan satu pemenang untuk semua EV, melainkan mencocokkan kimia dengan kebutuhan kendaraan dan sistem energi. Konsumen perlu memilih berdasarkan rute serta akses pengisian; armada perlu menghitung total biaya layanan; produsen perlu mengembangkan portofolio dan mutu; pemerintah harus membangun industri yang dapat beradaptasi; dan investor perlu menguji berbagai skenario. Bagi Indonesia, keunggulan sumber daya nikel tetap bernilai ketika disertai produktivitas dan tanggung jawab lingkungan. Pada saat yang sama, penguasaan LFP, paket, pengujian, daur ulang, dan sistem baterai dapat memperluas basis kemampuan nasional. Prospek terbaik dimiliki industri yang tidak hanya memiliki mineral,

tetapi mampu belajar dan menghasilkan teknologi yang aman, kompetitif, serta dipercaya pasar.

Sebagai kaidah praktis, LFP patut diprioritaskan ketika kendaraan dapat memenuhi layanan dengan kapasitas yang wajar, pengisian tersedia secara teratur, dan biaya awal atau keselamatan termal menjadi perhatian utama. NMC/NCA patut dipertimbangkan ketika kapasitas dalam ruang terbatas, massa paket, jarak jauh, atau muatan efektif menjadi faktor pembatas. Kedua pilihan harus melewati pengujian kendaraan, analisis total biaya, penilaian daur hidup, dan pemeriksaan dukungan purnajual. Produsen perlu menjelaskan kondisi garansi serta kinerja pada suhu dan pola pengisian yang relevan. Pemerintah dapat mengurangi bias keputusan dengan menyediakan standar pembandingan yang transparan. Kerangka sederhana ini tidak menghapus kompromi, tetapi membuat kompromi dapat diketahui dan dinilai sebelum modal, subsidi, atau keputusan konsumen terkunci.

Matriks ringkas perbandingan

Dimensi	LFP ($LiFePO_4$)	NMC/NCA berbasis nikel
Katoda	Litium, besi, fosfat; tanpa nikel/kobalt	Mengandung nikel; NMC juga mangan dan kobalt, NCA juga aluminium
Energi per massa/volume	Biasanya lebih rendah pada tingkat sel	Biasanya lebih tinggi; bermanfaat saat ruang dan massa terbatas
Biaya material	Berpotensi lebih rendah dan kurang terpapar harga Ni/Co	Lebih peka terhadap harga nikel/kobalt, tetapi skala dan desain memengaruhi biaya

Keselamatan termal	Stabilitas katoda relatif baik; tetap perlu proteksi sistem	Memerlukan manajemen panas dan proteksi yang matang; keselamatan bergantung desain
Penggunaan yang sering sesuai	Kendaraan massal, rute harian, armada dengan pengisian terencana	Jarak jauh, performa tinggi, muatan/ruang yang menuntut kepadatan energi
Daur ulang	Layak dipulihkan; keekonomian perlu meningkatkan nilai Li/grafit	Nikel/kobalt memberi nilai material sekunder lebih besar; proses tetap perlu kendali dampak

Glossarium

Baterai lithium-ion — Baterai isi ulang yang memindahkan ion litium antara katoda dan anoda selama pengisian dan pelepasan energi.

BMS (battery management system) — Sistem elektronik yang memantau tegangan, temperatur, arus, dan keadaan baterai serta mengatur batas operasinya.

Cell-to-pack — Desain paket yang mengurangi atau meniadakan lapisan modul agar sel dapat dikemas lebih langsung ke dalam paket.

Daur hidup (life cycle) — Tahapan material dari ekstraksi, produksi, penggunaan, perbaikan, penggunaan ulang, hingga daur ulang atau pembuangan.

Daur ulang — Pemrosesan baterai akhir masa pakai untuk memulihkan bahan yang dapat dipakai sebagai material sekunder.

Densitas energi — Jumlah energi yang dapat disimpan per satuan volume; berbeda dari energi spesifik yang dihitung per satuan massa.

Energi spesifik — Energi yang dapat disimpan per satuan massa, umumnya dinyatakan dalam Wh/kg.

LFP — Lithium iron phosphate; kimia katoda lithium-ion berbasis litium, besi, dan fosfat.

NCA — Lithium nickel cobalt aluminum oxide; kimia katoda berlapis yang mengandung nikel, kobalt, dan aluminium.

NMC — Lithium nickel manganese cobalt oxide; keluarga katoda berlapis dengan proporsi nikel, mangan, dan kobalt yang bervariasi.

State of charge (SoC) — Perkiraan tingkat energi yang tersimpan di dalam baterai dibandingkan kapasitas yang dapat digunakan.

State of health (SoH) — Ukuran kondisi baterai relatif terhadap kondisi awal, biasanya mencakup kapasitas dan/atau resistansi.

Thermal runaway — Kegagalan berantai akibat kenaikan panas yang tidak terkendali di dalam sel atau paket baterai.

Umur kalender — Perubahan kinerja baterai yang berlangsung seiring waktu, termasuk ketika baterai tidak menjalani siklus penuh.

Umur siklus — Jumlah siklus pengisian dan pengosongan sampai baterai mencapai batas kinerja akhir yang telah ditentukan.

LCA (life-cycle assessment) — Metode untuk menilai potensi dampak lingkungan suatu produk sepanjang tahapan daur hidup dengan batas dan asumsi tertentu.

Masa pakai kedua (second life) — Penggunaan baterai kendaraan yang kapasitasnya menurun untuk aplikasi lain sebelum didaur ulang.

GWh — Gigawatt-jam; satuan energi yang digunakan untuk menyatakan kapasitas atau pemasangan baterai skala besar.

Yield produksi — Proporsi produk yang memenuhi spesifikasi mutu setelah proses manufaktur.

Keterlacakan (traceability) — Kemampuan menelusuri asal bahan, fasilitas, proses, dan perpindahan produk sepanjang rantai pasok.

Daftar Pustaka

Evro, S., Ajumobi, A., Mayon, D., & Tomomewo, O. S. (2024). Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies. *Future Batteries, 4, Article 100007*. https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100007

International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025

International Energy Agency. (2026). *Global EV outlook 2026*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026

Koloch, J., Heienbrok, M., Kasperek, M., & Lienkamp, M. (2025). From cell to pack: Empirical analysis of the correlations between cell properties and battery pack characteristics of electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal, 16(9), Article 484*. https://doi.org/10.3390/wevj16090484

Ohneseit, S., Holocher, M. C., Kalk, A., Uhlmann, N., Seifert, H. J., & Ziebert, C. (2025). Aging behavior beyond SOH 80: An experimental aging study on commercial lithium-ion batteries with different cathode materials: Capacity loss, resistance change and impedance modeling. *Batteries & Supercaps, 8(5), e202400713*. https://doi.org/10.1002/batt.202400713

Paul, D., Pechancová, V., Saha, N., Pavelková, D., Saha, N., Motiei, M., Jamatia, T., Chaudhuri, M., Ivanichenko, A., Venher, M., Hrbáčková, L., & Sáha, P. (2024). Life cycle assessment of lithium-based batteries: Review of sustainability dimensions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 206, 114860*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114860

Picatoste, A., Schulz-Mönninghoff, M., Niero, M., Justel, D., & Mendoza, J. M. F. (2024). Comparing the circularity and life cycle environmental

performance of batteries for electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling, 210, 107833*. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107833

Schöberl, J., Ank, M., Schreiber, M., Wassiliadis, N., & Lienkamp, M. (2024). Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration. *eTransportation, 19, 100305*. https://doi.org/10.1016/j.etran.2023.100305

Wahyono, Y., Adi Sasongko, N., Trench, A., Anda, M., Hadiyanto, H., Aisyah, N., & Ariyanti, D. (2024). Assessing the impact of climate change and water scarcity of ferronickel production in Indonesia: A life cycle assessment approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 67, Article 103835*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103835

Catatan: Harga, pangsa pasar, dan proyeksi yang disebut dalam artikel merujuk pada periode sumber yang tercantum dan dapat berubah. DOI dicantumkan untuk artikel jurnal; laporan IEA dirujuk melalui URL penerbit.