

# Analisis *Life Cycle Assessment* Baterai pada Kendaraan

Ice Fahmi<sup>1</sup>, Tri Soelistyo<sup>2</sup>, Muhammad Maulani<sup>3</sup>, Fajar Gunawan Afandi<sup>4</sup>,  
Nugroho Adi Sasongko<sup>5</sup>, Donny Yoesgiantoro<sup>6</sup>

Dinas Penelitian dan Pengembangan TNI AU<sup>123</sup>  
Universitas Pertahanan Republik Indonesia<sup>1456</sup>

email : kimiadislitbangau@gmail.com

**Abstract** — Rechargeable batteries are required for the decarbonization of energy systems, but a life cycle environmental impact assessment has not yet reached a consensus on the environmental impact of producing these batteries. Nonetheless, life cycle assessment (LCA) is a powerful tool to inform the development of performing batteries with reduced environmental loads. This review explores common practice in lithium-ion battery LCAs and makes recommendations for how future studies can be more interpretable, representative and impactful. First, LCAs should focus resource depletion analyzes on long-term trends towards more energy and resource-intensive material extraction and processing rather than treating known reserves as depleted fixed quantities. Second, future studies should take into account extraction and processing operations that deviate from industry best practice and may be responsible for a large share of sectoral impacts, such as artisanal cobalt mining. Third, LCAs should explore at least 2-3 scale battery manufacturing facilities to capture size- and throughput-dependent impacts such as dry-room conditioning and solvent recovery. Lastly, future LCAs will have to move away from the mass kg battery as a functional unit and instead take advantage of kWh of storage capacity and kWh of energy throughput over a lifetime.

**Keyword:** battery; LCA; Lithium-ion; electric vehicle

**Abstrak** — Baterai isi ulang diperlukan untuk dekarbonisasi sistem energi, tetapi penilaian dampak lingkungan siklus hidup belum mencapai konsensus tentang dampak lingkungan dari produksi baterai ini. Meskipun demikian, penilaian siklus hidup (LCA) adalah alat yang ampuh untuk menginformasikan pengembangan kinerja baterai dengan beban lingkungan yang berkurang. Ulasan ini mengeksplorasi praktik umum dalam LCA baterai lithium-ion dan membuat rekomendasi tentang bagaimana studi di masa depan dapat lebih dapat ditafsirkan, representatif, dan berdampak. Pertama, LCA harus memfokuskan analisis penipisan sumber daya pada tren jangka panjang menuju ekstraksi dan pemrosesan bahan yang lebih intensif energi dan sumber daya daripada memperlakukan cadangan yang diketahui sebagai jumlah tetap yang habis. Kedua, studi masa depan harus mempertimbangkan operasi ekstraksi dan pemrosesan yang menyimpang dari praktik terbaik industri dan mungkin bertanggung jawab atas sebagian besar dampak sektoral, seperti penambangan kobalt rakyat. Ketiga, LCA harus mengeksplorasi setidaknya 2-3 skala fasilitas manufaktur baterai untuk menangkap dampak yang bergantung pada ukuran dan throughput seperti pengkondisian ruang kering dan pemulihan pelarut. Terakhir, LCA masa depan harus beralih dari baterai kg massa sebagai unit fungsional dan sebagai gantinya memanfaatkan kWh kapasitas penyimpanan dan kWh throughput energi selama masa pakai.

**Kata Kunci:** Baterai; LCA; Lithium-ion; Kendaraan Listrik

## PENDAHULUAN

Penyimpanan energi sangat penting untuk dekarbonisasi yang cepat dari jaringan listrik dan sektor transportasi. Baterai memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan akan penyimpanan listrik jangka pendek pada jaringan listrik dan kendaraan listrik untuk menyimpan dan menggunakan energi sesuai kebutuhan. Namun, penggunaan bahan yang penting untuk baterai dan dampak lingkungan hulu dari manufaktur sering disebut sebagai kelemahan penggunaan baterai yang dapat diisi ulang secara luas.[4,5] Penilaian siklus hidup (LCA) adalah pendekatan yang banyak digunakan untuk menguji potensi dampak. Produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai skala besar dan/atau daur ulang. Pada intinya, LCA adalah metodologi untuk mengukur beban lingkungan langsung dan tidak langsung yang terkait dengan produk atau layanan.[6] Ini juga merupakan kerangka kerja yang berguna untuk mengeksplorasi dampak lingkungan antara berbagai teknologi berbeda tetapi fungsinya sama atau sebanding. Namun, menerapkan LCA ke baterai adalah hal yang menantang karena berbagai alasan mulai dari pilihan metodologi hingga kelangkaan data primer tentang pembuatan baterai.

Sampai saat ini, belum ada konsensus di bidang LCA tentang bagaimana dampak lingkungan dari baterai harus dianalisis, atau bagaimana hasilnya harus dilaporkan. Studi menggunakan berbagai batasan sistem, unit fungsional, sumber data primer (yang pada gilirannya melaporkan data pada tingkat perincian yang berbeda), dan inventaris siklus hidup, titik tengah, dan kategori dampak. Hal ini membuat perbandingan silang dari teknologi yang berbeda. Hal ini juga membatasi kemampuan LCA untuk memberikan umpan balik untuk awal penelitian ilmiah dan pengembangan teknologi. Karena hal itu dapat membatasi kemampuan kita untuk mendeteksi dan memperbaiki kesalahan dalam literatur; biasanya hasil inventaris siklus hidup bervariasi

menurut satu atau lebih urutan besarnya di seluruh literatur dan sebagian besar ulasan tidak dapat menjelaskan penyebab mendasar dari perbedaan tersebut.

Ellingsen et al. (2017) berfokus pada emisi gas rumah kaca (GRK) siklus hidup dan mencatat bahwa hasil yang dipublikasikan sebelumnya berbeda dalam urutan besarnya, dengan perbedaan didorong oleh permintaan energi langsung untuk pembuatan sel dan perakitan paket. Pellow et al. (2020) berfokus pada kesenjangan dalam rentang kasus penggunaan yang dievaluasi dan kebutuhan akan studi tambahan tentang manajemen akhir masa pakai. Nealer dan Hen drickson (2015) berfokus pada EV dan merangkum temuan penelitian sebelumnya tentang keuntungan energi dan GRK dari EV. Nordelöf et al (2014) membahas 79 LCA untuk hybrid, plug-in hybrid, dan EV murni dan studi ini berfokus lebih luas pada sumber ketidakpastian yang terkait dengan kendaraan ringan dan penggunaannya, sebagai lawan dari teknologi baterai secara khusus. Peters et al (2017) meninjau beragam LCA baterai dan menawarkan wawasan berharga tentang studi mana yang menggunakan data primer dan yang mengandalkan sumber data sekunder; tinjauan ini juga memberikan diskusi mendalam tentang masa pakai baterai dan efisiensi *round-trip*. Peters et al (2007) mencatat, bahwa perkiraan penggunaan energi manufaktur bervariasi di seluruh literatur setidaknya dengan urutan besarnya. Namun, mereka tidak berusaha memberikan penjelasan rinci dan akhirnya mengandalkan penghitungan rata-rata hasil dari penelitian sebelumnya. Menggunakan rata-rata yang dihitung ini, dikombinasikan dengan faktor normalisasi Eropa 1995 untuk setiap dampak siklus hidup, Peters et al. (2007) menyarankan bahwa potensi pemanasan global (GWP) mungkin bukan metrik lingkungan yang paling penting, karena penipisan abiotik, potensi pengasaman, dan potensi toksisitas

manusia semuanya menghasilkan dampak normal yang lebih besar.

Sekitar 80% dari Baterai yang dipakai adalah baterai lithium-ion pada tahun 2016. Teknologi penyimpanan energi untuk rumah tangga diperkirakan akan tumbuh secara dramatis menjadi lebih dari 500.000 pada tahun 2025 (Frost & Sullivan, 2019). Meningkatnya keunggulan baterai lithium-ion sebagai teknologi penyimpanan energi untuk perumahan membuat kesadaran dalam hal potensi dampak lingkungan dari berbagai bahan kimia yang digunakan (Schmidt et al, 2017). Baterai dapat memaksimalkan penggunaan energi terbarukan yang bersifat intermiten. Baterai akan menyimpan kelebihan produksi energi dan energi yang disimpan dapat digunakan kembali saat dibutuhkan. Daya dan energi spesifik yang tinggi menjadikan lithium-ion salah satu teknologi paling menjanjikan saat ini tersedia untuk penyimpanan energi baik untuk perumahan ataupun konteks lain seperti bisnis dan pembangkit energi terbarukan (Fitzgerald, 2015).

Ada berbagai senyawa kimia baterai lithium-ion, menggunakan bahan aktif yang berbeda di katoda dan anoda. Senyawa kimia yang dipakai baterai lithium-ion, yaitu:

1. LFP-C (Lithium iron phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ) cathode active material with graphite anode active material).
2. NMC-C (Lithium nickel manganese cobalt oxide ( $\text{LiNi}_0.4\text{Mn}_0.4\text{Co}_0.2\text{O}_2$ ) cathode active material with graphite anode active material).
3. NCA-C
4. LMO-C (Lithium manganese oxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) cathode active material with graphite anode active material).
5. NCO-LTO (NCO-LTO Lithium nickel cobalt oxide ( $\text{LiNi}_4\text{Co}_0.2\text{O}_{20}$ ) cathode active material with lithium titanate oxide ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) anode active material)

Dalam satu dekade terakhir, *life cycle inventory* untuk pembuatan baterai lithium-ion telah dikembangkan yang bertujuan untuk pemodelan dampak lingkungan. Menurut Hiremath et al (2015) bahwa baterai lithium-ion umum memiliki *lifetime* yang lebih baik potensi dalam hal pemanasan global. Sebagian besar penelitian saat ini berfokus pada baterai yang digunakan pada kendaraan listrik. Tampaknya penelitian yang mempertimbangkan kinerja lingkungan baterai lithium-ion perumahan menggunakan spesifikasi sistem yang tersedia secara komersial masih relatif sedikit (Peters, 2017).

Analisis Peters et al.(2017) telah menunjukkan berbagai hasil yang diperoleh oleh LCA lithium-ion sebelumnya yang menggunakan nilai yang berbeda untuk energi spesifik dan *life cycle*. Usaha kedepannya yaitu membuat LCA ini lebih sebanding dengan menstandarisasi metode penilaian dampak, batasan sistem, dan asumsi seputar komposisi baterai dan pembuatannya. Banyak fitur lain yang sering diabaikan, seperti pengaruh masa pakai kalender, berapa kali baterai didaur ulang setiap hari, konsumsi sendiri, retensi kapasitas, dan kebutuhan akan inverter baterai. Selanjutnya, dampak lingkungan dari baterai dengan *life cycle* yang tinggi menggunakan elektroda negatif LTO jarang diselidiki.

Barnhart dan Benson (2013) meneliti permintaan energi primer dari berbagai teknologi penyimpanan energi. Metrik energi yang tersimpan pada energi yang diinvestasikan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memasukkan energi yang digunakan untuk mengisi baterai selama masa pakai baterai.

## Skenario siklus baterai (*Battery cycling scenarios*)

Pertimbangan skenario siklus sangat penting dalam menentukan masa pakai sistem baterai relatif terhadap masa pakai kalender dan harapan masa pakai siklus, sehingga tiga skenario siklus baterai diselidiki. Pertama, daya baterai terisi dan kosong setiap dua hari sekali, sesuai dengan skenario di mana pengguna tidak menggunakan baterai secara intensif. Kedua, siklus terisi dan kosong baterai sehari sekali, sesuai dengan siklus yang diharapkan oleh pengguna normal dari baterai, mengisinya di siang

hari dan menghabiskannya dari malam hingga pagi hari. Terakhir, baterai untuk perumahan dipakai secara intensif dengan siklus daya penuh dan kosong 4 kali sehari yang sesuai dengan penggunaannya dalam penyeimbangan jaringan yang merupakan layanan yang telah ditawarkan oleh beberapa produsen baterai dalam kasus penggunaan rumah tangga. Turbin angin, pengaturan frekuensi, perataan beban, dan arbitrase energi juga memerlukan pelepasan yang sering (Pfenninger, I. Staffell).

## Teknologi Baterai Lithium-Ion

LIB adalah kimia baterai yang paling umum digunakan dan, meskipun makalah ini tidak berfokus pada detail teknologi, perlu dijelaskan secara singkat jenis LIB yang paling umum dieksplorasi dalam literatur saat ini. Penelitian terus dilakukan pada pengembangan teknologi baterai non-LIB, antara lain baterai sodium-ion, baterai potassium-ion, baterai solid-state (Li-metal, Li-sulfur, dan rechargeable zinc alkaline), baterai flow, dan multivalent. baterai, tetapi LIB kemungkinan akan terus mendominasi pasar dalam waktu dekat. LIB biasanya dibedakan berdasarkan bahan katodanya: lithium mangan oksida (LMO), lithium nikel mangan kobalt oksida (NMC), lithium besi fosfat (LFP), dan lithium nikel kobalt aluminium oksida (NCA). Sebagian besar baterai yang dieksplorasi dalam studi LCA sebelumnya menggunakan anoda karbon grafit. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, baterai NMC, NCA, LFP, dan LMO dengan anoda grafit biasanya diperkirakan bertahan selama 1000-3000 siklus atau lebih.[15-21] Baterai ini memiliki energi spesifik pada tingkat sel mulai dari 90 menjadi 250 Wh kg<sup>-1</sup>. Para peneliti sedang mengeksplorasi anoda lain, seperti lithium titanate (LTO) dan kami telah memasukkan data baterai LFP-LTO pada Tabel 1 juga; baterai LFP-LTO menawarkan

masa pakai yang lebih lama (5000+) dengan mengorbankan energi spesifik, yang lebih rendah daripada semua jenis LIB lainnya pada Tabel 1. Baterai NCA-grafit mencapai energi spesifik tertinggi, tetapi menonjol karena peringkat keamanannya yang relatif buruk, dengan suhu lari termal yang jauh lebih rendah daripada pesaingnya. Bahan kimia LIB lainnya, seperti LCO sengaja dihilangkan karena relevansinya yang menurun dalam sistem penyimpanan energi skala kendaraan dan jaringan. Konfigurasi “bebas anoda”, seperti baterai Zinc MnO<sub>2</sub>, sedang dalam tahap awal pengembangan dan berpotensi meningkatkan densitas energi dibandingkan baterai dengan anoda grafit. Sisa dari tinjauan ini akan fokus pada kimia LIB yang diuraikan dalam Tabel 1.

Li-ion battery chemistry	Cell-level specific energy [Wh kg <sup>-1</sup> ]	Nominal voltage [V]	Cycle life [Cycles]	Shelf life [Years]	Operating temperature [°C]	Thermal runaway [°C]	Price per kWh rating	Price per kWh rating	Primary use cases	Representative manufacturers	Common cathode composition
NMC-Graphite	140-200	3.7	2000+	8-10	0-55	210	Med-High	Med-High	Power tools, EV	CATL, Saft, Panasonic, Samsung, LG Chem, SK Innovation	NMC111 <sup>a</sup> , NMC332 <sup>b</sup> , NMC442 <sup>c</sup> , NMC811 <sup>d</sup>
NCA-Graphite	200-250	3.6	2000+	8-10	0-55	150	Med	Med	EV	Tesla/Panasonic	-
LFP-Graphite	90-140	3.2	3000+	8-12	0-55	270	Low	Low	EV, Grid-Scale Stationary	BYD, K2, Ushen, Saft, GS Yuasa, AIZ, Valence, BAK	-
LFP-LTO <sup>e</sup>	≤80	2.7	5000+	10+	-40-55	>270	Very high	Very high	Personal electronics, some EVs	Altamano, Toshiba, Tabo	-
LMO-Graphite	100-140	3.7	1000-2000	6-10	0-55	250	Low	Low	Power tools, EV's (Tip, with NMC blend)	Hitachi, Samsung, LG Chem, Toshiba, NEC	Layered spital

<sup>a</sup>Li<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Co<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>; <sup>b</sup>Li<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Mn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub>; <sup>c</sup>Li<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Mn<sub>0.2</sub>Co<sub>0.8</sub>O<sub>2</sub>; <sup>d</sup>Li<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Mn<sub>0.1</sub>Co<sub>0.9</sub>O<sub>2</sub>; <sup>e</sup>Li<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>; <sup>f</sup>LFP; <sup>g</sup>Li<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub>; <sup>h</sup>LiMnPO<sub>4</sub>

Tabel 1. Karakteristik baterai berdasarkan senyawa kimia baterai lithium-ion.

## **Life-Cycle Assessment Overview**

Untuk membandingkan dampak lingkungan dari berbagai teknologi baterai, atau sekadar memahami dampak penuh dari peningkatan produksi dan penggunaan baterai, LCA harus dirancang untuk menjawab pertanyaan yang jelas. LCA umumnya ditentukan oleh empat fase kunci. Setiap fase semuanya penting untuk menyelesaikan setiap kajian:

1. Fase definisi tujuan dan ruang lingkup,
2. Fase analisis inventaris,
3. Fase penilaian dampak, dan
4. Fase interpretasi.

Selama fase definisi tujuan dan ruang lingkup peneliti harus memutuskan pertanyaan apa yang ingin mereka jawab dan membiarkan pertanyaan itu memandu definisi batas sistem, metrik lingkungan, dan satu atau lebih unit fungsional. Dalam konteks baterai, hasil LCA dapat digunakan untuk menginformasikan upaya penelitian dan pengembangan baterai (R&D) yang bertujuan mengurangi dampak lingkungan yang merugikan, membandingkan opsi teknologi baterai yang bersaing untuk kasus penggunaan tertentu, atau memperkirakan implikasi lingkungan dari adopsi skala besar dalam aplikasi jaringan atau kendaraan (Deng et al, 2017).

LCA paling mudah diterapkan pada unit fungsional yang terdefinisi dengan baik; dengan kata lain, setiap dampak lingkungan mudah dinormalisasi per unit produk atau layanan yang disediakan (misalnya, g CO<sub>2</sub> yang dipancarkan per kWh listrik yang dihasilkan). Namun, baterai menimbulkan tantangan khusus untuk LCA karena secara historis telah diterapkan. Baterai hanya menyimpan energi untuk digunakan nanti, dan bagaimana baterai diisi daya kembali akan mempengaruhi umur panjangnya dan nilai layanan yang diberikan dengan cara yang tidak mudah diprediksi. Jika sebuah penelitian membandingkan beberapa teknologi baterai yang diterapkan pada kasus penggunaan yang sama, akan sangat masuk akal untuk

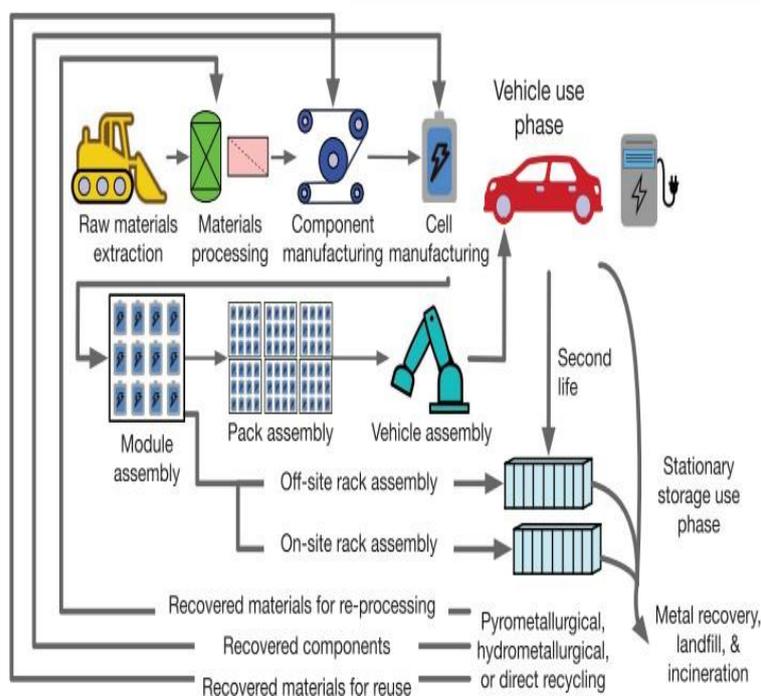
menormalkan hasil berdasarkan fungsi yang diberikan. Kelemahan dari pendekatan ini adalah sangat sulit untuk membandingkan beberapa penelitian, karena setiap peneliti pasti menggunakan asumsi yang berbeda tentang bagaimana baterai digunakan selama masa pakainya. Sebaliknya, penilaian satu atau lebih teknologi baterai tahap awal yang dimaksudkan untuk menginformasikan penelitian lebih lanjut mungkin tidak memiliki data kinerja fase penggunaan yang andal. Dalam hal ini, mungkin tepat untuk menggambar batas sistem yang berakhir di gerbang pabrik, dan cukup catat setiap perbedaan potensial dalam masa pakai siklus yang pada akhirnya dapat mempengaruhi umur panjang baterai.

Studi yang mendefinisikan batas sistem tidak termasuk fase penggunaan dan akhir masa pakai biasanya disebut sebagai cradle-to-gate (di mana "gerbang" mengacu pada gerbang pabrik). Studi termasuk fase penggunaan dan akhir kehidupan disebut sebagai cradle-to-grave; ini dapat mencakup penggunaan kembali, daur ulang, dan akhirnya pembuangan.[6] Istilah cradle-to-cradle telah digunakan untuk merujuk pada sistem yang mencakup daur ulang, tetapi umumnya dimaksudkan untuk menyarankan proses tanpa limbah[41] dan dengan demikian tidak umum digunakan untuk merujuk pada siklus hidup baterai, bahkan jika itu termasuk daur ulang.

## Life Cycle baterai stasioner dan baterai kendaraan

Gambar 1 menunjukkan siklus hidup khas untuk LIB di EV dan aplikasi penyimpanan skala grid, dimulai dengan ekstraksi bahan baku, diikuti oleh pengolahan bahan, manufaktur komponen, manufaktur sel, dan perakitan modul. Modul jadi dapat dirakit menjadi paket dan ditempatkan di kendaraan, dirakit menjadi rak di tempat untuk pengiriman ke fasilitas penyimpanan stasioner, atau dikirim langsung sebagai modul untuk perakitan rak di luar lokasi di lokasi penyimpanan energi. Semua LCA harus dimulai dengan

ekstraksi bahan mentah, terlepas dari ruang lingkungannya. Peneliti kemudian memutuskan apakah akan mengaitkan analisis mereka dengan kasus penggunaan tertentu dan, jika demikian, apakah akan memperluas batas sistem melalui fase penggunaan dan akhir masa pakai (EOL). Bahkan dalam studi cradle-to-gate, peneliti harus berhati-hati untuk menunjukkan bentuk baterai di gerbang pabrik; modul, paket, atau rak rakitan lengkap (dalam hal penyimpanan stasioner) (Fu, 2018).



Gambar 1: Tahap life-cycle baterai untuk kendaraan dan baterai stasioner (Porzio dan Scown, 2021)

Mayoritas LCA baterai terkait dengan kasus penggunaan tertentu, seperti EV, solar hybrid dan sistem baterai, atau penyimpanan mandiri yang terhubung ke jaringan. Ini adalah pendekatan yang lebih disukai, jika memungkinkan karena perbedaan kinerja (misalnya, bulat efisiensi perjalanan dan siklus hidup) penting untuk definisi unit fungsional umum di mana alternatif yang berbeda dapat dibandingkan. Namun, tidak semua studi menyertakan fase penggunaan

baterai untuk aplikasi tertentu, juga tidak selalu layak untuk teknologi baterai pra-komersial yang lebih maju. Wang dkk. (2019) melakukan analisis penggunaan-agnostik untuk membandingkan dampak lingkungan dari bahan katoda yang berbeda dan melakukan analisis cradle-to-gate baterai asam timbal, LMO, dan LFP. Untuk analisis penggunaan-agnostik cradle-to-gate dari LIB, peneliti masih harus memilih konfigurasi paket atau rak yang terkait dengan aplikasi

stasioner atau EV. Dalam LCA yang benar-benar menggunakan-agnostik, batas sistem mungkin perlu ditetapkan pada tahap perakitan modul, karena perakitan paket atau rak (termasuk komponen seperti manajemen termal dan kontrol listrik) akan sangat berbeda tergantung pada bagaimana baterai akan digunakan (lihat Gambar 1). LCA *cradle-to-grave* mempertimbangkan bagaimana

baterai akan digunakan dan dirawat di akhir masa pakainya termasuk pengumpulan, daur ulang, dan/atau pembuangan. Ada beberapa pilihan untuk daur ulang, mulai dari daur ulang langsung khusus kimia hingga daur ulang hidrometalurgi dan daur ulang pirometalurgi, yang lebih fleksibel dan bertujuan untuk memulihkan hanya logam berharga dari baterai.

## Isu terkini dan rekomendasi kedepan

Mengukur dampak lingkungan dari produksi baterai dapat tampak sangat rumit. Studi di masa mendatang agar dapat menyederhanakan dan memprioritaskan upaya mereka berdasar kan proses dan bahan yang merupakan kontributor terbesar. Kelengkapannya memiliki nilai, tetapi harus diakui bahwa itu juga ada harganya; memilih sejumlah besar kategori inventaris, titik tengah, atau titik akhir meningkatkan kemungkinan bahwa peneliti akan mengandalkan data inventaris dan faktor karakterisasi yang tidak berkorelasi secara teknologi, temporal, dan/atau geografis dengan detail penelitian. Memilih inventaris siklus hidup, titik tengah, dan/atau metrik titik akhir yang cenderung menghasilkan wawasan terbaik (dan memiliki data berkualitas cukup tinggi untuk mendukung kesimpulan tersebut) akan membuat LCA baterai masa depan lebih dapat ditafsirkan dan berdampak. Kami juga mendesak kepada para peneliti untuk melampaui representasi praktik terbaik industri dan mengembangkan kumpulan data yang menangkap pembohong atau “superemitter”, khususnya dalam penambangan dan pemrosesan material. Memilah dampak lingkungan berdasarkan lokasi dan jenis operasi dapat memberikan transparansi dan akurasi yang lebih baik, dan juga menetapkan kerangka kerja di mana perusahaan yang secara hati-hati mengelola rantai pasokan mereka untuk menghindari pemasok tersebut dapat dikenali dalam perkiraan jejak lingkungan mereka (Porzio dan Scown, 2021).

Meningkatkan interpretasi dan dampak LCA baterai masa depan juga akan mengharuskan setiap studi melakukan analisis sensitivitas di berbagai skala fasilitas manufaktur. Jelas dari tinjauan literatur bahwa poin ini, dan penyimpangan yang dihasilkan dalam perkiraan penggunaan energi manufaktur, menyebabkan lebih banyak kebingungan daripada parameter lainnya. (Porzio dan Scown, 2021) merekomendasikan bahwa LCA masa depan menentukan dua atau tiga skala fasilitas, pada urutan 0,1, 1, dan 10 GWh per tahun output kapasitas baterai dan menghasilkan hasil di seluruh skala yang berbeda ini. Skenario skala fasilitas khusus dapat dipilih berdasarkan “titik kritis” ekonomi untuk perubahan dalam desain, misalnya, sistem pemulihan NMP atau peralatan pendingin ruangan kering. Menunjukkan dengan jelas kemungkinan kerusakan penggunaan energi panas versus energi listrik juga akan memberikan nilai yang sangat besar, karena banyak penelitian tidak membedakan keduanya. LCA yang menggunakan laporan pasar untuk memperkirakan penggunaan energi rata-rata global untuk pembuatan baterai, dan idealnya memproyeksikan tren potensial, juga sangat dibutuhkan untuk menggam barkan kesenjangan antara literatur saat ini dan praktik saat ini/masa depan di industri (Porzio dan Scown, 2021).

## KESIMPULAN

Kesimpulan akhir dari tinjauan (Porzio dan Scown, 2021) adalah bahwa LCA cradle-to-grave lengkap dari beberapa teknologi baterai dapat dibuat lebih mudah dikendalikan dengan produksi skenario berbasis konsensus untuk mengatasi beberapa sumber utama ketidakpastian untuk analisis ini. Secara khusus, skenario yang menangkap keterediaan bahan baku penting, distribusi geografis sumber jangka pendek dan jangka panjang, dan setiap perubahan yang diharapkan dalam metode ekstraksi/ pemrosesan akan mengurangi ketegangan pada sumber data di bawah standar dan memungkinkan perbandingan silang yang lebih mudah antara studi baterai yang berbeda. Hal yang sama berlaku untuk fase penggunaan baterai; sebagian besar peneliti dan praktisi LCA tidak memiliki sumber daya dan keahlian materi pelajaran untuk mengembangkan skenario terperinci untuk siklus baterai, suhu pengoperasian, dan SOC, juga skenario seperti itu tidak dapat dengan mudah diterjemahkan ke perubahan yang diharapkan dalam kapasitas yang memudar, efisiensi, dan masa pakai. Namun, jika sekelompok ahli mampu merancang rangkaian skenario yang mencerminkan kasus penggunaan yang paling mungkin untuk baterai dalam aplikasi transportasi dan stasioner, ini akan digunakan secara luas dan selanjutnya meningkatkan kemampuan untuk membandingkan studi dan memvalidasi hasil secara eksternal. Proyek harmonisasi yang ambisius bukanlah hal yang tidak pernah terdengar [128] dan, melalui kemitraan antara pakar analisis sistem dan pakar teknologi, komunitas dapat memastikan bahwa analisis teknologi baterai di masa depan meningkatkan pemahaman kita tentang dampaknya terhadap lingkungan.

Sistem baterai yang berbasis di sekitar empat senyawa kimia (NMC-C, LFP C, LMO-C dan NCA-C) memiliki jejak karbon yang sebanding dalam kisaran 200-225 kgCO<sub>2</sub>e per kWh dari kapasitas yang dapat digunakan. Bahan kimia

kelima yang dipertimbangkan (NCO-LTO) memiliki kira-kira dua kali dampak lingkungan dari bahan kimia lainnya. Ini terutama karena energinya yang rendah, memberikan massa yang lebih besar untuk sistem 8,1 kWh. Namun, siklus hidup kimia yang lebih besar berarti bahwa LTO bisa menjadi teknologi yang paling ramah lingkungan untuk penggunaan yang membutuhkan siklus intensif. Jika baterai diperkirakan akan didaur ulang lebih dari dua kali sehari, NCO-LTO adalah pilihan terbaik di semua kategori yang dibandingkan. Jika pemakaian baterai sehingga siklus daya terisi dan kosong sekali per hari atau kurang, maka penggunaan NCO-LTO adalah pilihan terburuk. Untuk baterai yang didaur ulang kurang dari dua kali sehari, bahan kimia LFP-C, NCA-C atau NMC-C adalah pilihan terbaik, dan ini adalah bahan kimia yang dominan di antara teknologi penyimpanan baterai untuk rumah. Ketika siklus baterai yang dipakai sekali per hari, jejak karbon yang terkandung dari penyimpanan baterai perumahan berada dalam kisaran 40-80 gCO<sub>2</sub>e/kWh di lima bahan kimia yang dianalisis. Kisaran ini meningkat menjadi 90-180 untuk satu siklus setiap dua hari dan turun menjadi 20-60 untuk empat siklus per hari.

Manufaktur inverter bertanggung jawab sekitar setengah dari dampak pemanasan global sistem baterai perumahan, dan antara sepertiga dan setengah dari kelangkaan sumber daya mineral. Sebaliknya, lithium merupakan bagian yang relatif kecil dari dampak lingkungan secara keseluruhan, berkontribusi sekitar 5-15% dari dampak bahan aktif baterai. Ini menyoroti pentingnya teknologi elektronika daya tambahan, dan kebutuhan untuk mengalihkan perdebatan dari pemanasan lithium sebagai 'environmental hot spot' utama dalam pembuatan baterai yang harus ditingkatkan.

LCA komprehensif dari instalasi c-Si PV kontemporer yang dipasang di tanah telah menunjukkan bahwa dari sudut pandang

emisi karbon, energi terbarukan, dan kinerja energi bersih, keuntungan yang cukup besar dari keseluruhan pembangkit listrik termal konvensional PV dapat diharapkan untuk tetap tidak terpengaruh oleh penyebaran bahkan sejumlah besar penyimpanan elektrokimia (LIB). Pengurangan siklus hidup emisi asam PV sehubungan dengan pembangkit listrik tenaga batu bara dan generator “puncak” juga dipertahankan, terlepas dari jumlah penyimpanan energi yang digunakan. Disimpulkan bahwa menambahkan penyimpanan LIB ke PV tidak secara signifikan mengurangi keberlanjutannya secara keseluruhan. Penelitian lebih lanjut kemudian

dapat melibatkan analisis yang lebih rinci, di mana profil pasokan dan permintaan listrik per jam dari wilayah geografis yang terdefinisi dengan baik diperhitungkan. Ini akan memperkenalkan batasan yang lebih spesifik pada PV dan generator VRE lainnya, dan memungkinkan penentuan yang akurat dari jumlah penyimpanan aktual yang diperlukan dalam setiap kasus untuk mengoptimalkan pencocokan beban dan meminimalkan pembatasan; dalam melakukannya, kebutuhan akan serangkaian skenario dalam kuantifikasi dampak lingkungan yang dihasilkan (dari PV serta seluruh campuran jaringan) akan disingkirkan.

## REFERENSI

- NA Sasongko, U Qonita, R Murniati, C Kurniawan. Tinjauan Teknologi Sintesis Graphene-Like-Graphite (GLG) dari Green Petroleum Coke (GCP) sebagai Bahan Anoda Berkapasitas Tinggi untuk Baterai Lithium-Ion (2020).
- Frost & Sullivan. Global residential battery energy storage market, forecast to 2022. 2019.
- O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, I. Staffell, The future cost of electrical energy storage based on experience rates, *Nat. Energy* 2 (2017) 17110, <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110>
- Fitzgerald, G.; Mandel, J.; Morris, J.; Touati, H. The economics of battery energy storage: how multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. 2015.
- J.F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, M. Weil, The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters - a review, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 67 (2017) 491-506, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>.
- M. Hiremath, K. Derendorf, T. Vogt, Comparative life cycle assessment of battery storage systems for stationary applications, *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015) 4825-4833, <https://doi.org/10.1021/es504572q>.
- C.J. Barnhart, S.M. Benson, On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage, *Energy Environ. Sci.* 6 (2013) 1083-1092, <https://doi.org/10.1039/C3EE24040A>.
- S. Pfenninger, I. Staffell, Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data, *Energy* 114 (2016) 1251-1265, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>.
- L. A.-W. Ellingsen, C. R. Hung, A. H. Strømman, *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 2017, 55, 82.
- M. A. Pellow, H. Ambrose, D. Mulvaney, R. Betita, S. Shaw, *Sustainable Mater. Technol.* 2020, 23, e00120.
- R. Nealer, T. P. Hendrickson, *Curr. Sustainable Renewable Energy Rep.* 2015, 2, 66

A. Nordelöf, M. Messagie, A.-M. Tillman, M. Ljunggren Söderman, J. van Mierlo, Int. J. Life Cycle Assess. 2014, 19, 1866

J. F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, M. Weil, Renewable Sustainable Energy Rev. 2017, 67, 491.

Y. Deng, J. Li, T. Li, X. Gao, C. Yuan, J. Power Sources 2017, 343, 284.