



**“SISTEM LIFE CYCLE ASSESSMENT BATERAI  
LITHIUM UNTUK MENGOPTIMASI DAMPAK  
LINGKUNGAN MENGGUNAKAN *MACHINE  
LEARNING*”**

**KUALIFIKASI**

Rijal Solahuddien  
99223136

**PROGRAM DOKTOR TEKNOLOGI INFORMASI  
UNIVERSITAS GUNADARMA  
Agustus 2024**

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri otomotif saat ini sedang mengalami perubahan paradigma dari kendaraan konvensional dengan bahan bakar diesel dan bensin, menjadi kendaraan hybrid dan listrik. Namun, di balik kemajuan kendaraan listrik, terdapat pertimbangan penting terkait dengan keberlanjutan lingkungan, seperti polusi udara, pemanasan global, dan penipisan bahan bakar fosil yang diakibatkan kendaraan yang mengeluarkan gas rumah kaca seperti karbondioksida, dinitrogen oksida, dan metana. Permasalahan ini dapat diatasi dengan energi hijau alternatif menggunakan penerapan *Artificial Intelligence* (AI), dimana teknologi AI populer untuk mengubah sebuah paradigma di dunia teknologi dengan inovasi yang diberikan, terutama ketika teknologi AI bergantung pada sumber daya energi tertentu, seperti baterai lithium.

Baterai *lithium* telah menjadi pilihan dalam memberdayakan sistem AI, memberikan daya yang diperlukan untuk menjalankan proses pengolahan data yang kompleks. Menurut Rohman, (2020) Baterai adalah suatu sel elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik, dan salah satu faktor penggunaan baterai lithium adalah penyimpanan energi yang dibutuhkan dengan sangat cepat/ jangka pendek dari jaringan listrik dan sektor transportasi (Frost & Sullivan, 2020). Namun, seiring dengan peningkatan penggunaan baterai ini, muncul pula kekhawatiran akan dampak lingkungan yang dihasilkan dari seluruh siklus hidupnya, dari produksi hingga pembuangan (Sasongko, 2020). Oleh karena itu, penting untuk melakukan *life cycle assessment* (LCA) yang komprehensif untuk memahami dampaknya secara menyeluruh dan mengidentifikasi strategi optimisasi untuk mengurangi jejak lingkungan yang dihasilkan. Salah satu kelebihan baterai *lithium-ion* ini yaitu memiliki stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik (daya tahan sampai 10 tahun atau lebih), energi densitas tinggi, tidak ada memori efek, dan berat yang relatif ringan dibandingkan dengan baterai jenis lain. Sedangkan kekurangan baterai *lithium-ion* yaitu masa pakai terbatas dan tidak dapat digunakan setelah masa pakai habis. Peranan baterai *lithium-ion* sebagai teknologi penyimpanan energi, membuat kesadaran dalam hal potensi penggunaannya terhadap dampak lingkungan (Schmidt et al, 2019). Dimana hal tersebut berkaitan dengan bagaimana proses pembuatan baterai secara masif di produksi oleh manufaktur dari hulu ke hilir. Pada penelitian ini LCA berfokus pada sistem produk baterai lithium yang digunakan oleh kendaraan listrik, dan LCA produk baterai lithium-ion dapat

dibagi menjadi lima tahapan, yaitu pengambilan bahan mentah (*raw material acquisition*), dimana merupakan kegiatan yang berkaitan dengan perolehan sumber daya alam, termasuk penambangan bahan tak terbarukan, pengambilan biomasa, dan pengangkutan bahan mentah ke fasilitas pengujian. Proses pengolahan material (*material processing*), dimana proses ini dilakukan pengolahan sumber daya alam melalui tahap reaksi, pemisahan, pemurnian, dan pengubahan sebagai persiapan tahap pembuatan. Produksi baterai (*production*), dimana pada tahap ini dilakukan pembuatan komponen sel baterai dan kemasan baterai (*battery packs*). Penggunaan baterai (*use*), dimana penggunaan baterai ini diterapkan pada kendaraan listrik. Serta, daur ulang baterai (*end of life*), dimana dilakukan pemulihan baterai pada akhir masa pakainya pada kendaraan listrik (ISO 14040: 2006). Daya dan energi spesifik yang tinggi menjadikan *lithium-ion* salah satu teknologi paling menjanjikan saat ini, karena baterai *lithium-ion* dapat memaksimalkan penggunaan energi terbarukan yang bersifat intermiten. Pada proses produksi baterai mencakup tahap ekstraksi bahan mentah, pembuatan komponen, dan pembuatan baterai; penggunaan baterai mencakup aplikasi primer (seperti kendaraan listrik) dan aplikasi sekunder (seperti stasiun pangkalan komunikasi) (Lai X, et al., 2022).

LCA adalah metode pendekatan yang bisa digunakan untuk menguji potensi dampak produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai atau daur ulang (Sasongko, 2020). Menurut Uzair M, et al. (2021) LCA merupakan metodologi untuk mengukur beban lingkungan langsung dan tidak langsung yang terkait dengan produk dan layanan. Selain itu, LCA merupakan kerangka kerja yang berguna untuk mengeksplorasi dampak lingkungan antara berbagai teknologi berbeda tetapi fungsinya sama atau sebanding. Menurut ISO 14040: 2006, LCA merupakan kompilasi dan evaluasi masukan, keluaran dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk disepanjang daur hidupnya atau biasa disebut *cradle-to-grave*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium, serta bagaimana kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan dan daur ulang baterai tersebut. Memodelkan LCA yang mencakup penilaian dampak produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai lithium terhadap lingkungan dengan penerapan AI. Mengoptimisasi sistem untuk menentukan kebijakan optimal dengan tujuan mengurangi dampak lingkungan. Mengembangkan algoritma kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai baterai, serta mengurangi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium. Menganalisis penggunaan kendaraan listrik dari bahan baterai lithium-ion terhadap dampak lingkungan, dan mengevaluasi peranan teknologi kecerdasan buatan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai lithium.

Penelitian untuk penerapan LCA terhadap baterai lithium-ion perlu berfokus pada data yang akan teliti dan penerapannya perlu menggunakan metode, terdapat dua metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu untuk pemodelan LCA dan penerapan *machine learning* (ML) untuk pemodelan LCA menggunakan metode berbasis proses dan input-output untuk menghitung dampak lingkungan, sedangkan untuk penerapan ML menggunakan metode *Reinforcement Learning* (RL) dengan model DQN.

Menurut Nealer et al. (2015) dimana penelitiannya berfokus pada penggunaan baterai untuk kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV), yang hasil kesimpulannya terdapat keuntungan dari penggunaan EV terhadap pengurangan gas rumah kaca. Tetapi, Ellingsen et al. (2019) meneliti tentang pengaruh dampak lingkungan emisi gas rumah kaca terhadap penggunaan baterai *lithium-ion*, yang mencatat bahwa hasil dari emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari penggunaan baterai *lithium-ion* itu tidak sepenuhnya menjadi solusi dari pengurangan emisi, dilihat dari faktor pembuatan sel baterai dan daur ulang baterai.

Penelitian ini memiliki relevansi yang signifikan dalam mengarahkan perkembangan teknologi ke arah yang lebih berkelanjutan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang dampak lingkungan dari baterai lithium dalam konteks AI, dan dapat mengambil langkah-langkah konkret untuk melindungi lingkungan dengan tetap memajukan inovasi teknologi. Masalah-masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan Pemodelan LCA, pada penelitian ini model yang digunakan adalah model berbasis AI dengan ML dan optimasi berbasis AI. Model berbasis AI dan ML digunakan sebagai teknik untuk memperbaiki prediksi dampak lingkungan dan mengidentifikasi pola dalam data yang dikumpulkan dari analisis LCA. Model AI yang digunakan adalah Regresi, model ini digunakan untuk optimasi dan pengambil keputusan dinamis dalam konteks LCA, memungkinkan adaptasi model berdasarkan umpan balik analisis dampak lingkungan. Optimasi Berbasis AI digunakan untuk mengoptimalkan berbagai parameter dalam model LCA, termasuk pemilihan material, desain proses dan strategi manajemen akhir hayat (*end-of-life*), dengan model optimasi AI yang dipakai yaitu *reinforcement learning*. Inovasi teknologinya melakukan pengembangan algoritma dan melakukan sistem terintegrasi yang menggabungkan ML dengan LCA, untuk menyediakan solusi untuk analisis dan optimasi dampak lingkungan. Oleh karena itu, harapan dari penelitian ini yaitu dapat meningkatkan keputusan dalam mengambil keputusan untuk mengurangi dampak lingkungan dari produk baterai lithium-ion pada kendaraan listrik, dan memberikan wawasan berharga bagi pemangku kepentingan di berbagai sektor, mulai dari

industri hingga kebijakan publik, dalam upaya mereka untuk mencapai pembangunan yang berkelanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang masalah penelitian yang telah diuraikan dan sesuai dengan usulan topik penelitian, rumusan masalah bertujuan untuk mengarahkan penelitian dalam memahami dampak lingkungan dari baterai lithium dalam konteks kecerdasan buatan serta mengeksplorasi strategi yang dapat diadopsi untuk mengoptimalkan keberlanjutan siklus hidup baterai tersebut. Maka rumusan masalah pokok yang harus diteliti adalah sebagai berikut:

1. Apa saja dampak lingkungan yang terkait dengan produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai *lithium* yang digunakan dalam AI?
2. Bagaimana memodelkan LCA terhadap dampak lingkungan antara berbagai tahapan siklus hidup baterai lithium, termasuk produksi, penggunaan, dan pembuangan, dalam konteks teknologi AI?
3. Apa saja strategi optimasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi dampak lingkungan dari baterai *lithium* dalam aplikasi AI?
4. Bagaimana merencanakan tindak dalam implementasi strategi optimisasi tersebut dapat mempengaruhi keberlanjutan dan efisiensi sistem kecerdasan buatan yang menggunakan baterai *lithium*?
5. Bagaimana menganalisis penggunaan mobil listrik dari bahan baterai lithium-ion terhadap dampak lingkungan?
6. Bagaimana peran teknologi kecerdasan buatan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai lithium?

## 1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan uraian rumusan masalah, maka batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian berfokus pada baterai lithium dalam konteks aplikasi AI, dengan penekanan pada penggunaan baterai tersebut dalam sistem AI.
2. Pembatasan pada penilaian LCA dari baterai *lithium*, dengan fokus pada dampak lingkungan yang terkait dengan produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai tersebut.
3. Model LCA yang digunakan mengikuti pedoman penilaian ISO 14040/44 dan model AI yang digunakan adalah *reinforcement learning*.

4. Dataset yang digunakan adalah data material baterai dan data penggunaan baterai yang berasal dari *website Datadryad.org*.
5. Lingkup penelitian akan mempertimbangkan sumber daya alam yang digunakan dalam produksi baterai lithium, termasuk proses ekstraksi dan pengolahan.
6. Evaluasi akan mencakup analisis dampak lingkungan selama tahap penggunaan baterai, termasuk dampak lingkungan.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengeksplorasi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium, serta bagaimana kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan dan daur ulang baterai tersebut.
2. Memodelkan *life cycle assessment* yang mencakup penilaian dampak produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai lithium terhadap lingkungan dengan penerapan AI.
3. Mengoptimisasi sistem dengan menggunakan model *Reinforcement Learning* (RL) dengan model DQN untuk menentukan kebijakan optimal dengan tujuan mengurangi dampak lingkungan.
4. Mengembangkan algoritma kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai baterai, serta mengurangi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium.
5. Menganalisis penggunaan mobil listrik dari bahan baterai lithium-ion terhadap dampak lingkungan.
6. Mengevaluasi peranan teknologi kecerdasan buatan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai lithium.

#### **1.5 Kontribusi dan Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang signifikan terhadap upaya-upaya untuk memperbaiki keberlanjutan lingkungan dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya baterai lithium, dengan mempromosikan inovasi dan kemajuan dalam bidang teknologi kecerdasan buatan. Berikut merupakan kontribusi dan manfaat penelitian:

1. Pemahaman yang Lebih Baik tentang Dampak Lingkungan

Penelitian ini dapat membantu dalam memahami dampak keseluruhan dari siklus hidup baterai lithium terhadap lingkungan, termasuk penilaian yang lebih baik tentang dampak lingkungan yang terkait dengan produksi, penggunaan, dan pembuangan baterai.

## 2. Peningkatan Efisiensi Penggunaan Sumber Daya

Dengan menggunakan kecerdasan buatan, penelitian ini dapat membantu mengidentifikasi strategi dan teknologi baru untuk meningkatkan efisiensi penggunaan baterai lithium dan dapat mencakup pengembangan algoritma untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan umur pakai baterai.

## 3. Pengurangan Daur Ulang dan Pemborosan Sumber Daya

Dengan mengoptimalkan penggunaan baterai dan memperpanjang umur pakainya, penelitian ini dapat membantu mengurangi kebutuhan akan produksi baru baterai lithium. Hal ini dapat mengurangi dampak ekologis dari penambangan mineral yang diperlukan untuk produksi baterai baru.

## 4. Inovasi Teknologi

Penelitian ini dapat memicu inovasi dalam teknologi baterai dan kecerdasan buatan. Hal ini dapat menciptakan peluang baru untuk pengembangan produk dan layanan yang lebih ramah lingkungan dan efisien secara energi.

## **BAB II**

### **KAJIAN TEORI**

#### **2.1    *Life Cycle Assessment***

*Life Cycle Assessment* (LCA), atau yang dikenal sebagai Analisis Siklus Hidup, adalah suatu metode sistematis yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau proses dari tahap awal hingga akhir siklus hidupnya. LCA juga merupakan metode yang digunakan untuk menilai dampak terhadap lingkungan dari suatu tahapan siklus sebuah produk, proses, atau layanan, tujuannya memberikan informasi komprehensif tentang dampak lingkungan yang dihasilkan oleh suatu produk atau layanan, sehingga dapat membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan (KLHK, 2022). LCA mencakup semua tahapan mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Manfaat dari LCA sangat beragam. Pertama, LCA membantu mengidentifikasi titik-titik lemah dalam siklus hidup suatu produk yang menyebabkan dampak lingkungan yang signifikan. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk fokus pada peningkatan efisiensi dan pengurangan dampak lingkungan. Kedua, LCA juga dapat digunakan untuk membandingkan berbagai opsi produk atau proses sehingga memungkinkan pemilihan yang lebih berkelanjutan secara lingkungan. Selain itu, LCA juga dapat membantu perusahaan dalam pemenuhan regulasi lingkungan yang semakin ketat di berbagai negara. (ISO 14040/44)

*Life Cycle Assessment* atau LCA dimulai dari tahun 1970, dan pada tahun 1990, *Society of Environment Toxicology and Chemistry* (SETAC) mendefinisikan LCA sebagai metode untuk menilai dampak lingkungan dari produk, proses produksi, dan aktivitas melalui penggunaan material, konsumsi energi, dan emisi limbah. pada tahun 1970, International Standard Organisation (ISO) merumuskan rangkaian standar ISO 14000 yang mendefinisikan LCA sebagai lingkungan seluruh hidup produk mulai dari pengadaan bahan mentah, penggunaan dan pembuangan, dampak potensial, kesehatan manusia, sumber daya dan hasil ekologi. Penilaian daur hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan SNI ISO 14040: 2016 dan SNI ISO 14040: 2017 merupakan kompilasi dan evaluasi masukan, keluaran, dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk di seluruh daur hidupnya dan ISO yang mengatur LCA adalah ISO 14040/44.

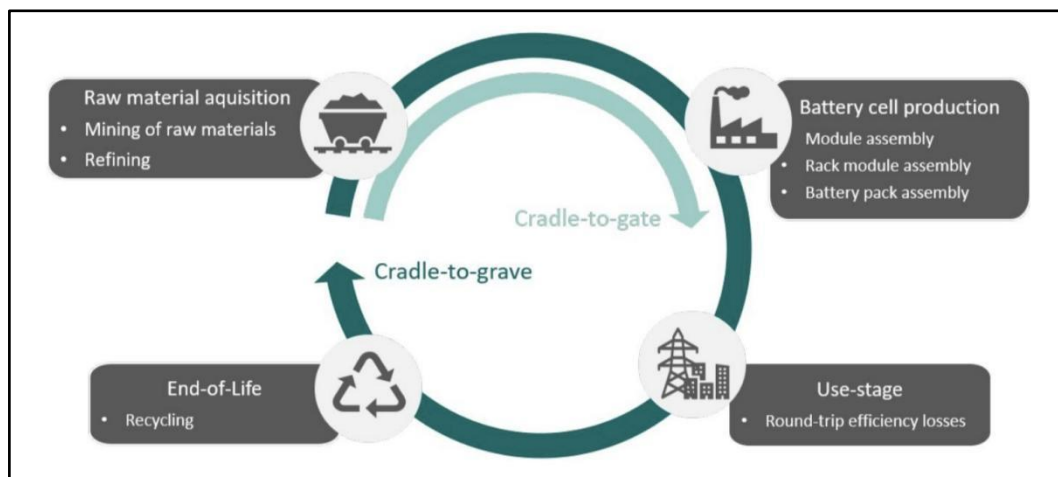
ISO 14040/44 merupakan standar internasional panduan utama untuk melakukan LCA, dan telah berkembang menjadi alat penting bagi industri dan organisasi untuk



mengukur dan mengelola dampak lingkungan dari produk dan proses mereka. termasuk teknik-teknik analisis yang lebih canggih dan penekanan pada interpretasi hasil yang lebih mendalam. Prinsip-prinsip utama dalam ISO 14040/44 tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga menekankan pentingnya keterlibatan stakeholder dan komunikasi yang efektif terkait hasil LCA. Dengan menerapkan standar ini, perusahaan dapat mengidentifikasi peluang untuk mengurangi dampak lingkungan mereka, meningkatkan efisiensi operasional, dan memenuhi tuntutan konsumen dan regulator yang semakin ketat terkait keberlanjutan lingkungan (ISO 14040/44).

Penerapan LCA telah meluas di berbagai industri, termasuk manufaktur, pertanian, transportasi, dan konstruksi. Contohnya, di industri manufaktur, LCA digunakan untuk memilih bahan baku yang lebih ramah lingkungan dan untuk mengoptimalkan proses produksi. Di sektor transportasi, LCA dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai jenis kendaraan atau mode transportasi terhadap lingkungan. Di bidang konstruksi, LCA membantu dalam memilih material bangunan yang lebih berkelanjutan serta merancang bangunan yang lebih efisien energi (ISO 14040/44)

LCA merupakan alat penting dalam upaya untuk mencapai pembangunan yang berkelanjutan dengan mempertimbangkan tidak hanya efisiensi ekonomi tetapi juga dampak lingkungan dari suatu produk atau proses selama seluruh siklus hidupnya. Dengan informasi yang diperoleh dari LCA, perusahaan dan masyarakat dapat mengambil langkah-langkah yang lebih cerdas dan berkelanjutan dalam menjaga lingkungan hidup untuk generasi mendatang. Berikut merupakan Gambar 2.1 Tahapan Umum *Life Cycle Assessment*.



**Gambar 2.1 Tahapan Umum *Life Cycle Assessment***  
(Sumber: Northvolt, 2023)

Gambar 2.1 menjelaskan tentang siklus *cradle-to-gate* dan *cradle-to-grave* pada *lifecycle product*, *cradle-to-gate* mencakup semua langkah dari akuisisi bahan baku hingga produksi sel

baterai, sedangkan *cradle-to-grave* meliputi seluruh siklus hidup baterai termasuk tahap penggunaan dan daur ulang di akhir masa pakai. Pada siklus *life cycle product* juga memiliki tahapan, yaitu

#### 1. Akuisisi Bahan Baku (*raw material acquisition*)

- Penambahan bahan baku (*mining of raw materials*), tahap ini melibatkan ekstraksi bahan-bahan mentah dari bumi yang diperlukan untuk membuat baterai seperti *lithium, cobalt, dan graphite*.
- Pemurnian (*refining*), setelah bahan mentah ditambang, selanjutnya harus dimurnikan untuk menghilangkan kotoran dan menghasilkan bahan berkualitas tinggi yang dapat digunakan dalam produksi sel baterai.

#### 2. Produksi Sel Baterai (*battery cell production*)

- Perakitan modul (*module assembly*), pada tahap ini, sel-sel baterai individual dirakit menjadi modul-modul yang lebih besar. Sel-sel tersebut dihubungkan bersama untuk membentuk unit yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi
- Perakitan modul rak (*rack module assembly*), modul-modul baterai kemudian dirakit ke dalam rak atau kerangka yang lebih besar, yang dapat menampung beberapa modul dan memberikan struktur yang diperlukan untuk integrasi lebih lanjut.
- Perakitan paket baterai (*battery pack assembly*), rak modul kemudian dirakit menjadi paket baterai lengkap yang siap untuk digunakan. Paket baterai ini mencakup sistem manajemen baterai (BMS) untuk memantau dan mengelola kinerja sel-sel baterai.

#### 3. Tahap Penggunaan (*use-stage*)

- Kerugian efisiensi perjalanan pulang-pergi (*round-trip efficiency losses*), selama dalam proses penggunaan, baterai mengalami kerugian efisiensi, yaitu perbedaan antara energi yang dimasukkan ke dalam baterai selama pengisian dan energi yang tersedia saat baterai digunakan, dimana biasanya disebabkan oleh resistensi internal dan proses kimia dalam baterai.

#### 4. Akhir Masa Pakai (*end-of-life*)

- Daur Ulang (*recycling*), setelah baterai mencapai akhir masa pakainya, baterai tersebut dapat didaur ulang untuk memulihkan bahan berharga dan mengurangi limbah. Proses daur ulang mencakup pemisahan komponen baterai dan pemurnian bahan yang dapat digunakan kembali untuk produksi baterai baru atau aplikasi lainnya.

## 2.2 Prinsip-Prinsip dan Manfaat *Life Cycle Assessment*

Penyusunan dokumen LCA produk adalah salah satu aspek penilaian dalam Dokumen Hijau PROPER 2021 (Permen LHK No. 1/2021) yang memuat dampak lingkungan dari sebuah aktivitas industri, selain itu dalam PROPER 2021, LCA juga diintegrasikan dengan upaya penurunan dampak lingkungan dalam pemanfaatan sumber daya. Upaya tersebut memuat peningkatan kinerja lingkungan melalui efisiensi energi, penurunan emisi, pengurangan dan pemanfaatan limbah B3, pengolahan limbah non-B3 (termasuk pengolahan *reduce, reuse, recycle*), efisiensi air dan penurunan beban pencemar. Dalam praktiknya, LCA dapat dicirikan oleh prinsip-prinsip berikut (KLHK, 2022).

### a. Siklus hidup perspektif

LCA mempertimbangkan seluruh siklus hidup fisik dari suatu produk atau jasa, sistem, ekstraksi bahan baku, energi dan material produksi, manufaktur, dan akhir operasi kehidupan.

### b. Transparansi

Karena kompleksitas yang melekat dalam penilaian sistem LCA, transparansi merupakan prinsip penting dalam melaksanakan studi LCA, dalam rangka untuk memastikan interpretasi yang tepat atas hasil.

### c. Sifat *iterative*

LCA terdiri dari empat tahap yaitu tujuan dan ruang lingkup, *Life Cycle Inventory* (LCI), *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dan Interpretasi.

### d. Fokus lingkungan

Mempelajari aspek lingkungan dari sistem produk, biasanya pada aspek ekonomi dan sosial berada di luar penelitian. LCA pada saat yang sama memberikan perspektif sistem, sehingga alat-alat analisis lain mungkin merujuk pada studi LCA untuk penilaian lingkungan yang lebih lengkap daripada yang disediakan oleh situs atau perspektif emisi individu.

### e. Berbasis *sains*

Metodologi dan studi harus berdasarkan ilmu, sementara keadaan pengetahuan ilmiah selalu berubah, studi LCA adalah *snapshot* dari keadaan tertentu pengetahuan pada waktu tertentu.

### f. Relatif alam (*relatively natural*)

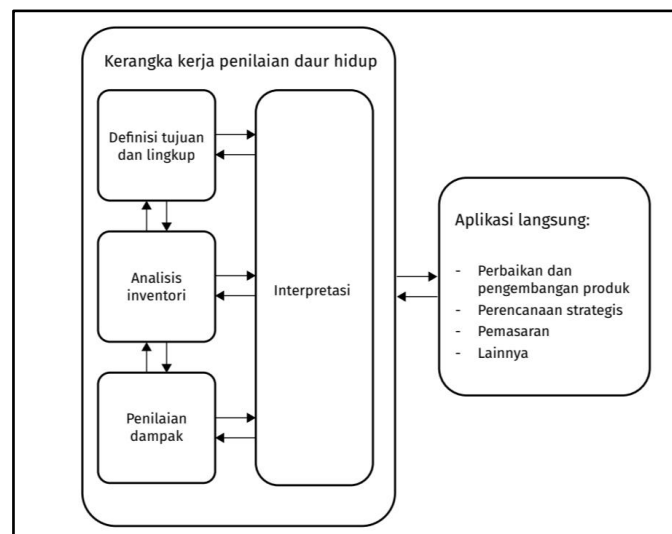
Hubungan aspek lingkungan ke sistem produk, semua temuan diukur dan dinyatakan dalam aspek lingkungan per-unit referensi, serta LCA berkaitan dengan suatu aspek penilaian siklus hidup produk terhadap dampak zat.

Pelaksanaan LCA dapat ditujukan untuk diterapkan dalam berbagai aplikasi, baik untuk pengembangan internal perusahaan, pengembangan kebijakan (baik dalam skala perusahaan, grup, maupun nasional), untuk kebutuhan pasar dan lain-lain. Berikut beberapa manfaat dari LCA (ISO 14040:2016).

- a. Melakukan identifikasi area perbaikan kinerja lingkungan hidup atau *hotspot* terkait dengan produk yang dihasilkan oleh Perusahaan.
- b. Melakukan identifikasi tahap daur hidup yang menyebabkan dampak paling penting.
- c. Melakukan penilaian dampak lingkungan sebagai basis (*baseline*).
- d. Melakukan penilaian dampak lingkungan atau jejak lingkungan.
- e. Mengomunikasikan hasil LCA kepada publik dalam bentuk label lingkungan.

### 2.3 Kerangka kerja penilaian daur hidup

Kerangka kerja penilaian daur hidup terdiri dari empat tahap, yaitu penentuan tujuan dan lingkup, analisis inventori daur hidup, penilaian dampak daur hidup, dan interpretasi (ISO 14040:2016). Berikut merupakan Gambar 2.2 Kerangka Kerja Penilaian Daur Hidup.



**Gambar 2.2 Kerangka Kerja Penilaian Daur Hidup**  
(Sumber: SNI ISO 14040: 2016)

#### 1. Definisi Tujuan dan Lingkup (Goal and Scope)

Tujuan penilaian untuk menentukan alasan dan kebutuhan untuk melakukan LCA, serta bagaimana hasilnya akan digunakan. (Marry Ann, 2019) Serta, ruang lingkup untuk menetapkan batasan sistem, terdiri dari:

- a. Fungsi produk atau sistem.
- b. Batasan sistem (misalnya, dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir).
- c. Kriteria pemilihan dan kategori dampak yang akan dianalisis.

- d. Tingkat detail dan presisi yang dibutuhkan.
2. Analisis Inventarisasi Daur Hidup (Life Cycle Inventory - LCI)
  - a. Pengumpulan Data, untuk mengumpulkan data terkait input (seperti bahan baku, energi) dan output (seperti emisi, limbah) dari semua tahap siklus hidup produk atau layanan.
  - b. Pengolahan Data, untuk mengorganisir dan menghitung data inventaris untuk mengidentifikasi beban lingkungan yang terkait dengan setiap fase.
3. Penilaian Dampak Daur Hidup (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)
  - a. Kategorisasi, untuk mengelompokkan data inventaris ke dalam kategori dampak lingkungan (misalnya, pemanasan global, pencemaran udara, dampak pada kesehatan manusia).
  - b. Kuantifikasi untuk menghitung dampak potensial berdasarkan data inventaris. Ini melibatkan penggunaan metode atau model untuk mengevaluasi seberapa besar dampak setiap kategori.
  - c. Normalisasi dan Pengkategorian untuk membandingkan hasil dengan standar atau nilai referensi, serta mengidentifikasi dampak relatif dari berbagai kategori.
4. Interpretasi (Interpretation)
  - a. Analisis Hasil, untuk menilai temuan dari tahap LCI dan LCIA untuk mengidentifikasi masalah signifikan dan peluang perbaikan.
  - b. Kesimpulan dan Rekomendasi, untuk menyusun kesimpulan yang didasarkan pada hasil analisis dan memberikan rekomendasi untuk pengurangan dampak lingkungan.
  - c. Verifikasi dan Validasi, untuk memastikan bahwa proses LCA telah dilakukan dengan benar dan hasilnya dapat diandalkan.
5. Aplikasi Penggunaan dan Tindak Lanjut (Use and Follow-up)
  - a. Implementasi, untuk menerapkan rekomendasi untuk perbaikan atau pengembangan produk yang lebih ramah lingkungan.
  - b. Tindak Lanjut, untuk memantau dan mengevaluasi efektivitas perubahan yang diterapkan dan melakukan LCA ulang jika diperlukan.

Pada penerapannya LCA memiliki beberapa model yang sering digunakan, yaitu CML 2001, EDIP 2003, ReCiPe, Eco-Indicator 99 dan EPS 2000 (Khanna, et al, 2022). Model-model ini dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu metode titik tengah dan metode titik akhir (Lai X, et al, 2022). Metode titik tengah adalah pengamatan awal terhadap dampak lingkungan, dengan fokus pada satu masalah ekologi, seperti toksisitas dan pemanasan yang ditimbulkan oleh manusia. Sedangkan, metode titik akhir berfokus pada dampak lingkungan

pada akhir rantai sebab akibat, dan indikator yang dihasilkan menunjukkan tingkat agregasi yang lebih tinggi dalam dampak lingkungan (Syafique M, et al, 2022).

## **2.4 *Lifecycle 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. Pertama, fase definisi tujuan dan ruang lingkup. Kedua, fase analisis inventaris. Ketiga, fase penilaian dampak, dan keempat 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, 2021). 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 (Hsieh A, 2021). Istilah cradle-to-cradle telah digunakan untuk merujuk pada sistem yang mencakup daur ulang, tetapi umumnya dimaksudkan untuk menyaran kan proses tanpa limbah dan tidak umum digunakan untuk merujuk pada siklus hidup baterai, bahkan jika itu termasuk daur ulang.

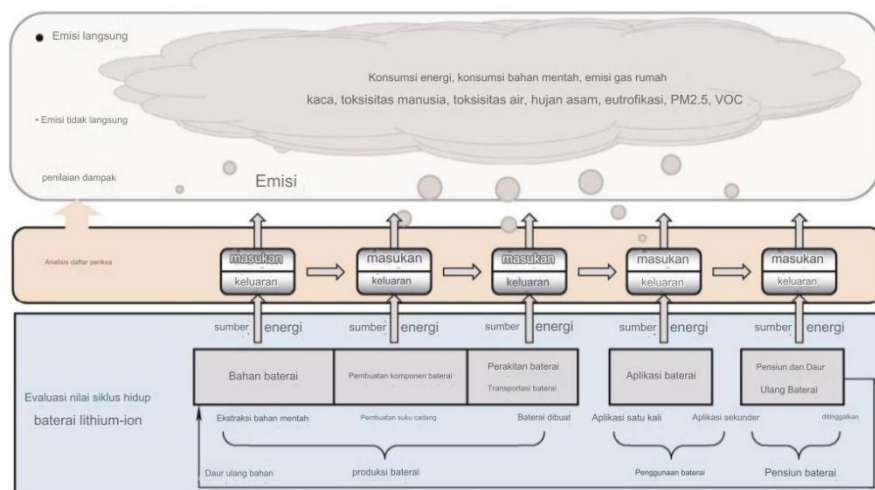
Tantangan dari sistem manajemen baterai saat ini adalah elektrifikasi transportasi menjadi skenario aplikasi terluas untuk baterai Li-ion, solusi manajemen baterai terutama dirancang untuk aplikasi kendaraan listrik dengan kapasitas baterai berkisar antara 100 hingga 80%. Untuk memastikan kinerja baterai yang efektif dalam kasus pengoperasian yang kompleks, mudah berubah, dan ekstrem, berbagai strategi manajemen pengoperasian baterai telah dirancang untuk melindungi baterai kendaraan listrik dari kesalahan pengoperasian dan untuk mengoptimalkan dinamika pengisian atau pengosongan baterai. Namun, dibandingkan dengan bidang manajemen pengoperasian baterai yang memiliki solusi yang bermanfaat, sejauh ini masih sedikit upaya yang telah dilakukan dalam menerapkan strategi berbasis ilmu data untuk memberi manfaat pada produksi dan pemanfaatan kembali baterai. Untuk manufaktur baterai, karena kinerja awal baterai akan ditentukan secara langsung oleh setiap tahap perantara dalam lini produksi, solusi manajemen baterai yang efektif yang dapat menganalisis pengaruh parameter manufaktur pada properti baterai dan mengoptimalkan jalur produksi sangatlah penting. Selain itu, baterai dapat menyumbang hingga 30% bobot dan biaya sebuah kendaraan listrik, sekaligus berkontribusi terhadap lebih dari 40% emisi CO<sub>2</sub> selama produksi kendaraan listrik (Higa K, 2020). Pengelolaan manufaktur baterai yang efisien menuju baterai berkualitas tinggi dan target ekonomi seperti hasil produksi yang tinggi, biaya produksi yang rendah, dan polusi yang lebih sedikit sangatlah penting dan memainkan peran penting dalam penerimaan baterai. Saat ini, karena manufaktur baterai umumnya mencakup sejumlah operasi kimia, mekanik, dan listrik, dan juga menghasilkan banyak parameter manufaktur yang sangat digabungkan dalam urutan puluhan atau ratusan, para insinyur sering kali mengandalkan pengalaman eksperimen, saran ahli, solusi coba-coba untuk menganalisis dan mengelola lini manufaktur baterai mereka. Solusi-solusi ini akan mengakibatkan memakan banyak tenaga dan waktu, lambatnya pengembangan produk baterai, kontrol kualitas yang tidak akurat, dan kesulitan dalam menghasilkan kasus bisnis yang berkelanjutan untuk pengenalan teknologi. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperkenalkan solusi canggih dan cerdas untuk mengelola manufaktur baterai, dan mengeksplorasi korelasi, interaksi, saling ketergantungan dari semua parameter yang relevan,

untuk meningkatkan kinerja manufaktur baterai. Dalam hal pemanfaatan baterai, di satu sisi, baterai Li-ion biasanya dianggap tidak cocok untuk aplikasi EV ketika kapasitas sebenarnya kurang dari 80% dari nilai nominalnya (Jiang Z, 2022). Akibatnya, sejumlah besar baterai otomotif akan dihentikan penggunaannya di tahun-tahun mendatang. Misalnya, 250.000 metrik ton baterai otomotif diperkirakan akan mencapai akhir masa pakainya (EoL) pada tahun 2025. Baterai dengan masa pakai kedua berpotensi menghasilkan lebih dari 200 GWh pada tahun 2030, dengan nilai global lebih dari \$30 miliar, menurut laporan lain, berdasarkan perkiraan yang paling optimis sekalipun, 3,4 juta kg sel baterai otomotif mungkin akan berakhir menjadi limbah streaming pada tahun 2040. (Ni K, 2023). Baterai-baterai bekas yang mengandung unsur-unsur kimia yang mudah menguap ini akan terlepas ke atmosfer jika tidak digunakan kembali sehingga akan menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan dan ekonomi. Di sisi lain, sebagai respons terhadap perubahan iklim global, banyak sumber energi terbarukan dan berkelanjutan seperti tenaga surya dan angin telah diadopsi. Namun, karena keberadaan sumber energi terbarukan yang terputus-putus dan berubah-ubah dari waktu ke waktu, energi yang dihasilkan akan berfluktuasi. Hal ini secara signifikan akan mempengaruhi kinerja jaringan, stabilitas tegangan, dan keandalan, sehingga menjadi sulit untuk diproses ke dalam jaringan. Berdasarkan solusi pemanfaatan kembali baterai yang sesuai, hal ini dapat dikurangi secara efektif jika energi yang dihasilkan dari sumber terbarukan pertama kali disimpan dalam baterai, dan kemudian diubah oleh topologi konverter elektronik daya yang sesuai untuk mencapai tegangan dan frekuensi jaringan yang diperlukan. Dalam konteks ini, memberikan solusi pemanfaatan kembali baterai yang sudah tidak digunakan lagi, yaitu pengelolaan baterai setelah mencapai kapasitas 80% tidak hanya akan mendukung perekonomian tetapi juga membantu meminimalkan total permintaan baterai, sehingga menghasilkan pengurangan penggunaan baterai secara signifikan. Mengekstraksi bahan kimia dan secara signifikan memberi manfaat pada banyak aplikasi masa pakai baterai kedua seperti penyimpanan energi jaringan. Berdasarkan diskusi di atas, masa pakai baterai mulai dari produksi, pengoperasian, dan pemanfaatan kembali secara keseluruhan perlu dikelola dengan hati-hati. Dengan pesatnya perkembangan kecerdasan buatan dan teknologi pembelajaran mesin, alat berbasis ilmu data menonjol sebagai solusi menjanjikan untuk manajemen masa pakai baterai, yang diharapkan memungkinkan kita mengatasi tantangan besar dalam menangani berbagai jenis data dari baterai, manufaktur operasi, dan pemanfaatan kembali. Berdasarkan hal ini, hologram baru yang dapat memanfaatkan baterai sepenuhnya selama masa pakai penuh dapat diformulasikan, sehingga semakin meningkatkan kemajuan teknologi rendah karbon.



## 2.5 Emisi Karbon dan Evaluasi Indeks Lingkungan dari Seluruh Siklus Hidup Baterai Lithium-Ion

Ikhtisar LCA baterai lithium-ion dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu produksi baterai, penggunaan baterai, dan daur ulang baterai. Produksi baterai mencakup tahap ekstraksi bahan mentah, pembuatan komponen, dan pembuatan baterai; penggunaan baterai mencakup aplikasi primer (seperti kendaraan listrik) dan aplikasi sekunder (seperti stasiun pangkalan komunikasi) (Lai X, et all, 2022); daur ulang baterai mengacu kepada penggunaan bahan baterai yang sudah tidak digunakan atau dekomining yang mengacu pada produksi ulang baterai. Bahan baterai lithium-ion dapat dibagi menjadi banyak jenis dilihat dari bahan katoda yang berbeda-beda, salah satunya yaitu nikel kobalt manganat, lithhium nikel kobalt aluminat, lithium besi fosfat, LFP, dll. Karena itu baterai yang berbeda-beda ini memiliki bahan mentah, proses produksi, kinerja baterai dan proses daur ulang yang berbeda-beda. Maka dari itu memerlukan pengumpulan data dan merumuskan daftar jenis baterai tertentu untuk melakukan penelitian LCA yang dipersonalisasi. Berikut merupakan Gambar 2.3 Emisi Karbon dan Evaluasi Indeks Lingkungan



**Gambar 2.3 Emisi Karbon dan Evaluasi Indeks Lingkungan**  
(Sumber: Lai X, et all, 2022)

Gambar 2.3 menunjukkan proses *loop* tertutup dari *cradle-to-cradle*. Saat melakukan LCA, perludilakukan perhitungan material dan energi pada setiap tahapan serta perhitungan emisi langsung dan tidak langsung pada setiap tahapan. Secara umum, emisi langsung mengacu pada emisi yang disebabkan oleh pelenusuran energi dan bahan mentah. Dengan menggunakan metode LCA, emisi karbon dan indikator lingkungan disetiap tahap siklus

hidup baterai lithium-ion dapat diukur, dan pengembangan baterai yang berkelanjutan dapat dipromosikan. terdiri dari:

## 1. Karbon dari Seluruh Siklus Hidup Baterai Lithium-Ion

Emisi karbon mengacu pada jumlah total gas rumah kaca (GHG), terutama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>), yang dilepaskan selama siklus hidup baterai lithium-ion (Ntziachristos, Leonidas, et al. 2019). Evaluasi ini biasanya dilakukan dengan menggunakan pendekatan *LCA*, yang mencakup :

### a. Tahap Produksi

- Ekstraksi Bahan Baku: Proses penambangan dan pengolahan bahan baku seperti litium, kobalt, nikel, dan grafit. Aktivitas ini sering kali melibatkan emisi karbon yang signifikan.
- Pembuatan Elektroda dan Sel Baterai: Produksi komponen baterai, termasuk pembuatan elektroda dan sel, biasanya memerlukan energi tinggi, seringkali dari sumber energi fosil, yang berkontribusi pada emisi karbon.

### b. Tahap Transportasi

Pengangkutan Bahan Baku: Transportasi bahan baku dari lokasi penambangan ke fasilitas pembuatan juga berkontribusi pada emisi karbon, tergantung pada metode transportasi (misalnya, truk, kapal, kereta api).

### c. Tahap Penggunaan

Energi yang Digunakan: Selama penggunaan, baterai lithium-ion dapat mempengaruhi emisi karbon tergantung pada sumber energi yang digunakan untuk mengisi daya baterai. Jika energi pengisian berasal dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil, emisi karbon selama fase penggunaan bisa signifikan.

### d. Tahap Akhir Masa Pakai dan Daur Ulang

Pengelolaan Akhir Masa Pakai: Proses pembuangan atau daur ulang baterai, termasuk pengumpulan, transportasi, dan pengolahan limbah baterai, dapat menghasilkan emisi karbon, terutama jika proses daur ulang tidak efisien atau menggunakan energi tinggi.

## 2. Evaluasi Indeks Lingkungan dari Seluruh Siklus Hidup Baterai Lithium-Ion

Indeks lingkungan mencakup penilaian dampak keseluruhan terhadap lingkungan dari siklus hidup baterai lithium-ion, tidak hanya terbatas pada emisi karbon (Wang, Michael Q., et al. 2019). Evaluasi ini sering melibatkan beberapa kategori dampak:

### a. Kategori Dampak Lingkungan

- Pemanasan Global: Melibatkan emisi gas rumah kaca seperti CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan N<sub>2</sub>O yang berkontribusi pada pemanasan global.

- Dampak terhadap Kesehatan Manusia: Meliputi efek berbahaya dari bahan kimia dan polusi yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia, baik selama produksi maupun penggunaan baterai.
- Pencemaran Air dan Tanah: Menilai potensi pencemaran dari limbah yang dihasilkan selama ekstraksi bahan baku, produksi, penggunaan, dan daur ulang.
- Penggunaan Sumber Daya: Mengukur konsumsi sumber daya alam seperti air dan bahan baku serta dampaknya terhadap kelangkaan sumber daya.

b. Indeks dan Metode Evaluasi

- Normalisasi: Membandingkan dampak dari baterai dengan standar atau nilai referensi untuk menilai signifikansi relatif dari dampak lingkungan.
- Pengkategorian: Mengelompokkan dampak dalam kategori yang relevan untuk mempermudah analisis dan pemahaman.
- Penilaian: Menggunakan metode penilaian dampak yang umum, seperti *TRACI* (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) atau *CML* (Centrum voor Milieu- en Levenscyclusanalyse) untuk menghitung dan mengelompokkan dampak.
- Penggunaan dan Implikasi  
Memahami emisi karbon dan indeks lingkungan dari siklus hidup baterai lithium-ion memungkinkan pengembang, produsen, dan pembuat kebijakan untuk:
  - Mengidentifikasi Area untuk Peningkatan: Mencari cara untuk mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan pada setiap tahap siklus hidup baterai.
  - Membandingkan Alternatif Teknologi: Membandingkan baterai lithium-ion dengan teknologi penyimpanan energi lain dalam hal dampak lingkungan.
  - Menginformasikan Keputusan Kebijakan: Memberikan data yang diperlukan untuk pengembangan kebijakan dan regulasi yang mendukung teknologi yang lebih ramah lingkungan.

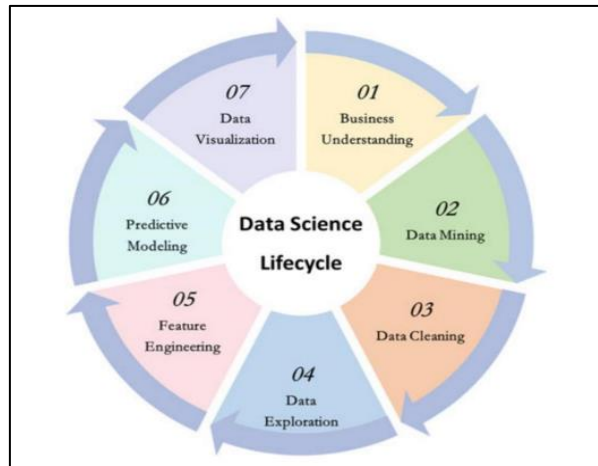
## 2.6 Artificial Intelligence Teknologi Ilmu Data dalam Penerapan LCA

Untuk memindahkan alat berbasis ilmu data yang diterapkan pada manajemen masa pakai baterai secara efisien, diperlukan pemahaman sistematis dan eksplorasi teknologi ilmu data. Alat berbasis ilmu data harus dijelaskan dan didiskusikan dengan baik dengan cara yang sesuai untuk khalayak luas.

### 2.6.1 Ilmu Data

Ilmu data adalah praktik menambang kumpulan data mentah dengan bentuk

terstruktur dan tidak terstruktur untuk mengidentifikasi pola tertentu dan mengekstrak wawasan bermakna dari data tersebut. Ilmu data ini termasuk dalam bidang interdisipliner yang terutama melibatkan statistik, otomasi, ilmu komputer, pembelajaran mesin, dan teknologi berbasis data baru untuk memperoleh wawasan dari data nyata. (Kailong Liu, 2023)



**Gambar 2.4 Siklus Hidup Ilmu Data yang Umum**  
**Sumber : Kailong Liu, (2023)**

Gambar 2.4 mengilustrasikan siklus hidup ilmu data umum yang mencakup tujuh bagian utama yaitu pemahaman bisnis, penambangan data, pembersihan data, eksplorasi data, rekayasa fitur, pemodelan prediktif, dan visualisasi data. Pemahaman bisnis terutama mengacu pada definisi pertanyaan dan tujuan relevan dari aplikasi yang perlu dieksplorasi. Penambangan data, data yang diperlukan perlu dikumpulkan dan dikikis. Pembersihan data, melibatkan solusi untuk memperbaiki inkonsistensi dalam data dan menangani nilai-nilai yang hilang. Eksplorasi data, data akan dianalisis secara visual untuk membentuk hipotesis masalah ilmu data yang ditentukan. Rekayasa fitur, pentingnya dan korelasi variabel fitur dari data akan diukur dan dianalisis. Pemodelan prediktif, alat ilmu data seperti model pembelajaran mesin akan dilatih, divalidasi, dan diadopsi untuk membuat prediksi baru. Visualisasi data, kesimpulan akan dilaporkan kepada pemangku kepentingan utama melalui berbagai plot dan alat visualisasi interaktif. (Lohr Steve. 2021).

Dalam menentukan tugas ilmu data dan mengelola proyek berbasis ilmu data dengan jelas, terdapat empat tahapan utama yang perlu dipertimbangkan, yaitu:

a. Arsitektur data

Tahap pertama dalam alur kerja alur ilmu data adalah mendefinisikan arsitektur data. Hal ini mengharuskan ilmuwan data untuk memikirkan terlebih dahulu bagaimana pengguna data dapat memanfaatkan data sepenuhnya. Kemudian data scientist juga perlu memikirkan cara mengatur data untuk mendukung analisis dan visualisasi yang berbeda.

b. Akuisisi data

Tahap selanjutnya adalah akuisisi data yang berfokus pada cara mengumpulkan data dari berbagai sumber seperti eksperimen atau aplikasi nyata. Di samping itu, berbagai solusi representasi, transformasi, dan pengelompokan diperlukan untuk membantu ilmuwan data memahami bagaimana data dapat direpresentasikan sebelum dianalisis

c. Analisis data

Analisis data adalah tahapan inti selama alur kerja ilmu data. Pada tahap ini, data scientist akan menggunakan berbagai alat teknis, matematika, dan statistik seperti AI dan pembelajaran mesin untuk melakukan pekerjaan analisis eksplorasi dan konfirmasi seperti klasifikasi, regresi, analisis prediktif, dan analisis kualitatif

d. Kesimpulan wawasan

Setelah analisis data, data scientist akan mengkomunikasikan wawasan yang diperoleh melalui visualisasi dan pelaporan data pada tahap ini. Hal ini dapat bermanfaat bagi para pemangku kepentingan untuk memperoleh kesimpulan yang bermanfaat, menyesuaikan kembali strategi mereka, dan menghasilkan rencana baru untuk evaluasi kembali. berbagai solusi representasi, transformasi, dan pengelompokan diperlukan untuk membantu ilmuwan data memahami bagaimana data dapat direpresentasikan sebelum dianalisis. Selain itu, banyak teknologi ilmu data perlu dilibatkan dalam alur kerja alur ilmu data.

Perlu diketahui bahwa semua teknologi ilmu data ini dirancang oleh bahasa pemrograman (Piatetsky-Shapiro, 2021), dan bahasa pemrograman yang banyak digunakan, meliputi:

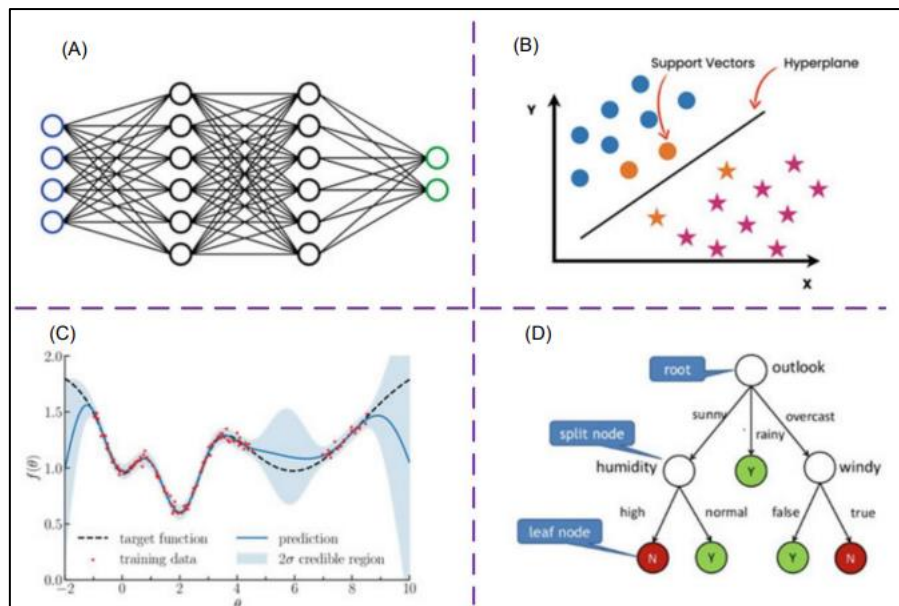
- *Python*, berdasarkan beberapa perpustakaan yang spesifik dan mudah diimplementasikan, Python menjadi bahasa sumber terbuka yang populer, yang telah banyak digunakan oleh akademisi dan industri khususnya di komunitas AI. Setelah dibuat pada tahun 1989, Python menjadi bahasa pemrograman yang layak untuk menawarkan berbagai alat untuk memanipulasi kumpulan data dan menganalisis hasil ilmu data dengan mudah dan nyaman. Selain itu, terdapat beberapa perpustakaan Python yang secara khusus berfokus pada pengembangan algoritma pembelajaran mesin, termasuk dan tidak terbatas pada Scikit-Learn, Keras, dan TensorFlow. Karena banyaknya forum bahasa pemrograman dan situs web yang menerbitkan banyak topik tentang implementasi Python, popularitas menjadi kelebihan lain dari Python. Secara umum, solusi ilmu data berbasis Python perlu dijalankan di bawah platform lintas platform bernama lingkungan pengembangan terintegrasi (IDE) termasuk Pycharm, Spyder, dan Jupyter Notebook, di mana antarmuka yang ramah dan kemungkinan

interaksi Python dengan bahasa pemrograman lain menjadi elemen kunci yang perlu diperhatikan (Vaidya S, 2020).

- *Matlab*, sebagai bahasa pemrograman yang efisien untuk komputasi teknis, MATLAB mampu mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam kondisi yang mudah diimplementasikan di mana permasalahan dan pendekatan ilmu data dapat diekspresikan dalam notasi matematika yang sudah dikenal. Elemen data dasar MATLAB hanyalah sebuah array tanpa memerlukan dimensi, yang selanjutnya memberikan manfaat bagi upaya komputasi berbagai masalah komputasi ilmu data khususnya yang menggunakan formulasi matriks atau vektor. Setelah dikembangkan selama beberapa tahun, MATLAB telah menjadi alat pengajaran standar untuk beberapa kursus pengantar dan lanjutan di bidang teknik otomasi dan ilmu data khususnya di lingkungan akademik. Selain itu, MATLAB memiliki serangkaian kotak peralatan bagi pengguna untuk mengeksplorasi dan menerapkan berbagai teknologi untuk aplikasi spesifik mereka. Untuk ilmu data, banyak kotak alat seperti kotak alat jaringan saraf, kotak alat pembelajaran mendalam, kotak alat pengoptimalan, dan kotak peralatan statistik dan pembelajaran mesin telah banyak digunakan untuk memecahkan berbagai masalah tertentu (Usseglio-Viretta FL, 2022)
- *Bahasa R*, setelah dikembangkan sekitar dekade terakhir abad kedua puluh, bahasa R juga menjadi sangat populer di bidang ilmu statistika. Dibandingkan dengan Python dan MATLAB, bahasa R kurang diterapkan untuk mengembangkan solusi ilmu data. Namun, ia mampu menyediakan perpustakaan statistik khusus termasuk MASS, stats, fdata, dan glmnet. Selain itu, pengguna dapat dengan mudah mencari detail mengenai cara menerapkan setiap perpustakaan dan paket berdasarkan Comprehensive R Archive Network (Chen B, 2020).
- *C++ dan Fortran*, C++ dan Fortran merupakan pionir bahasa pemrograman modern, yang telah banyak diadopsi sebagai bahasa berkinerja tinggi. Untuk aplikasi ilmu data, beberapa perpustakaan C++ termasuk SHARK dan MLPACK dapat digunakan untuk merancang pembelajaran mesin. Dibandingkan dengan bahasa Python, MATLAB, dan R, implementasi kode ilmu data melalui C++ dan Fortran akan menjadi lebih sulit karena biasanya diperlukan manajemen memori yang diperlukan (Kusano T, 2020).

### 2.6.2 Jenis Teknologi Ilmu Data

Teknologi ilmu data terutama berisi jenis pendekatan yang diawasi, tidak diawasi, dan semi-diawasi. Untuk variabel yang diawasi, variabel tertentu perlu didefinisikan sebagai input dan output sebelum kumpulan data terkait digunakan. Sebaliknya, definisi istilah masukan dan keluaran tidak ada untuk metode ilmu data tanpa pengawasan, yang targetnya adalah menemukan pola dalam kumpulan data secara otomatis (Zhang, Qing, et al. (2022)). Metode semi-supervisi berada di antara metode yang diawasi dan tidak diawasi, yang akan menerapkan kumpulan data yang berisi data berlabel dan tidak berlabel pendekatan ilmu data yang diawasi dapat dibagi lagi menjadi dua kategori utama termasuk metode regresi dan metode klasifikasi. Model regresi ilmu data menganalisis dan mengeluarkan data dalam bentuk nilai kontinu, sedangkan model klasifikasi ilmu data akan menganalisis dan mengeluarkan kelas dalam bentuk nilai diskrit. Kelas-kelas yang digunakan untuk pendekatan ilmu data yang diawasi dapat berasal dari operator atau dari metode ilmu data tanpa pengawasan. Untuk aplikasi manajemen baterai, terlepas dari jenis yang diadopsi, pendekatan ilmu data klasik sangat bergantung pada data dan tidak berhubungan dengan fisika, yang berarti bahwa pendekatan tersebut dapat ditujukan, misalnya, untuk menentukan pemetaan yang mendasari berbagai variabel, daripada menyediakan penjelasan fisik apa pun tentang pemetaan tersebut. Namun, melalui penggabungan elemen fisik baterai, metode ilmu data berbasis fisik juga ada. Berikut merupakan Gambar 2.5 Metode Ilmu Data.



**Gambar 2.5 Metode Ilmu data**  
**Sumber: Kailong Liu, (2019)**

Gambar 2.5 menunjukkan beberapa metode ilmu data yang paling banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan baterai. Perlu diketahui bahwa semua metode ini telah diadopsi dalam aplikasi manajemen masa pakai baterai penuh, yang meliputi:

- a. Jaringan saraf (NN), seperti diilustrasikan pada Gambar 2.5a, NN diusulkan untuk meniru aktivitas otak manusia melalui penggunaan unit pemrosesan neuron buatan yang disusun dalam lapisan masukan, lapisan keluaran, serta lapisan tersembunyi. Setelah melalui tahap pra-pemrosesan, data akan dimasukkan ke dalam lapisan masukan dengan matriks masukan yang telah ditentukan. Kemudian neuron di lapisan tersembunyi berisi fungsi matematika untuk menghasilkan keluaran di seluruh neuron dan dapat diekspresikan melalui penggunaan kombinasi linier berbobot yang dibungkus dalam fungsi aktivasi. Secara teori, Semakin besar bobot neuron, sensitivitas terhadap masukan spesifik ini akan semakin tinggi. Terakhir, lapisan keluaran akan menampilkan nilai prediksi NN. Untuk proses pelatihan NN, parameter di sini terutama dioptimalkan dengan mempertimbangkan jumlah lapisan tersembunyi, jumlah neuron dalam setiap lapisan, bobot neuron yang saling berhubungan, dan jenis fungsi aktivasi. Hingga saat ini, dua jenis NN berbeda yang banyak digunakan dalam aplikasi manajemen baterai, termasuk jaringan saraf maju-maju (FNN) dan jaringan saraf berulang (RNN). Pada model pertama, data hanya akan bergerak dalam satu arah saja. Setelah melengkapi koneksi umpan balik dengan FNN, RNN diturunkan. Dengan melibatkan tautan berulang, RNN mampu menyimpan dan memperbarui informasi sebelumnya untuk jangka waktu tertentu, menjadikannya alat yang menjanjikan untuk menangkap korelasi berurutan dalam aplikasi manajemen baterai. Misalnya, proses penuaan baterai biasanya terdiri dari ratusan siklus, sedangkan informasi penuaan di antara siklus-siklus tersebut sangat berkorelasi. Oleh karena itu, penting untuk mengekstrak dan menyimpan korelasi ini untuk prognosis masa pakai baterai yang akurat. Selain itu, karena mampu menangkap ketergantungan data jangka panjang, RNN menjadi alat yang efektif untuk menangkap dan memperbarui informasi berurutan selama manajemen baterai. Salah satu manfaat nyata dari NN adalah kemampuannya belajar dari pengalaman dan dapat beradaptasi dengan berbagai situasi. Namun, NN memerlukan data aplikasi baterai dalam jumlah besar untuk dilatih dan diverifikasi, dan keakuratannya akan sangat dipengaruhi oleh cara pelatihan dan kualitas data. Selain itu, upaya komputasi masih menjadi hambatan untuk penerapan skala besar dalam manajemen baterai dan struktur NN juga memainkan peran penting dalam menentukan kinerjanya. Dalam konteks ini, optimalisasi NN masih menjadi masalah teknis yang terbuka. Secara umum, struktur NN ditentukan oleh trial and error yang memakan waktu. Mengingat hal ini, beberapa



pendekatan optimasi seperti metode identifikasi bertahap yang dapat diadopsi untuk mengoptimalkan struktur NN untuk aplikasi manajemen baterai. (Yuan, Yao, & Zhao, Xuan. 2023).

- b. Support Vector Machine (SVM), SVM termasuk dalam alat ilmu data yang diawasi, SVM dapat melakukan tugas klasifikasi dan regresi dengan mencari kelas pemisah hyperplane dengan margin maksimal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5b. SVM dapat mengadopsi kernel untuk menangani masalah nonlinier dengan mengubah masalah nonlinier dengan ruang berdimensi rendah menjadi masalah linier dengan ruang berdimensi lebih tinggi. Secara teori, prediksi SVM didasarkan pada beberapa fungsi yang ditentukan pada ruang masukan, dan pembelajaran adalah proses untuk menyimpulkan parameter fungsi. (He Kaiming, 2022)
- c. Gaussian Process Regression (GPR), berasal dari kerangka Bayesian, model ilmu data berbasis GPR telah banyak diadopsi dalam aplikasi prognostik baterai karena keunggulannya dalam hal fleksibilitas, nonparametrik, dan probabilitas. GPR juga merupakan pendekatan ilmu data berbasis kernel, yang mampu mewujudkan prediksi yang dikombinasikan dengan pengetahuan sebelumnya serta memberikan varians di sekitar titik prediksi rata-rata untuk mengekspresikan ketidakpastian terkait, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5c. Di sini proses Gaussian dapat dianggap sebagai kumpulan variabel acak dalam jumlah terbatas yang menyajikan distribusi Gaussian multivariat gabungan. Secara teori, performa GPR sangat sensitif terhadap fungsi kernel, sehingga fungsi kernel perlu dirancang secara cermat untuk mencapai akurasi prediksi yang tinggi. Pengaplikasian baterai biasanya rumit dan akan dipengaruhi oleh banyak elemen dampak. Fungsi kernel tunggal akan dengan mudah menghasilkan prediksi yang tidak dapat diandalkan untuk pemetaan nonlinier dengan istilah masukan multidimensi (Bui Thang D, 2021)
- d. Solusi Berbasis Pohon (*Decision Tree*), solusi berbasis pohon adalah ilmu data pendukung keputusan dengan mengadopsi model seperti diagram alur untuk mencapai klasifikasi atau regresi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5d. Banyak solusi berbasis pohon seperti pohon keputusan (DT), hutan acak (RF), dan pendekatan berbasis peningkatan telah berhasil digunakan dalam penerapan manajemen baterai. Ide dasar DT adalah membagi isu prediksi yang rumit menjadi isu-isu yang lebih kecil berdasarkan struktur pohon. Dengan cara ini, setiap node dalam DT dapat mewakili submasalah kecil, sedangkan DT secara keseluruhan dapat menjadi solusi terhadap keseluruhan masalah. Untuk pelatihan DT, data akan disuntikkan terlebih dahulu ke root (yaitu node pertama

DT). Setelah itu, istilah masukan yang paling dapat membedakan keluaran akan dicari. Artinya, nilai ( $V_i$ ) mana dari suku masukan yang dapat membagi kumpulan data awal sedemikian rupa untuk memisahkan keluaran sebanyak mungkin akan dicari untuk meminimalkan kesalahan terkait (Jain, 2021).

## 2.7 Teknologi Baterai *Lithium-Ion*

Lithium-Ion Battery (LIB) adalah bahan kimia baterai yang paling umum digunakan, LIB biasanya dibedakan berdasarkan bahan katodanya yaitu lithium mangan oksida (LMO), lithium nikel mangan kobalt oksida (NMC), lithium besi fosfat (LFP), dan lithium nikel kobalt aluminium oksida (NCA). Meskipun penelitian pada saat terus dilakukan pada pengembangan teknologi baterai non-LIB, antara lain baterai sodium-ion, baterai potassium-ion, baterai solid-state (Li-metal, Li-sulfur, dan rechar geable zinc alkaline), dan battery multivalent. Dari berbagai macam jenis baterai non-LIB, baterai LIB memungkinkan akan terus mendominasi pasar dalam waktu dekat. Sebagian besar baterai yang dieksplorasi dalam studi LCA sebelumnya menggunakan bahan anoda karbon graphite, sehingga pada tinjauan ini akan berfokus pada bahan kimia LIB yang diuraikan yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 Karakteristik baterai berdasarkan senyawa kimia baterai lithium-ion (R. Nealer, 2020).

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 compositions
NMC-Graphite	140–200	3.7	2000+	8–10	0–55	210	Med-high	Med-high	Power tools, EV	CATL, Sanyo, Panasonic, Samsung, LG Chem, SK Innovation	NMC-111 <sup>(i)</sup> , NMC-532 <sup>(ii)</sup> , NMC-622 <sup>(iii)</sup> , NMC-811 <sup>(iv)</sup>
NCA <sup>(i)</sup> -Graphite	200–250	3.6	2000+	8–10	0–55	150	Med	Med	EV	Tesla/Panasonic	–
LFP <sup>(ii)</sup> -Graphite	90–140	3.2	3000+	8–12	0–55	270	Low	Low	EV, Grid-Scale Stationary	BYD, K2, Lishen, Saft, GS Yuasa, A123, Valence, BAK	–
LFP-LTO <sup>(ii)</sup>	≤80	2.7	5000+	10+	–40–55	>270	Very high	Very high	Personal electronics, some EVs	Altairnano, Toshiba, Yabo	–
LMO <sup>(ii)</sup> -Graphite	100–140	3.7	1000–2000	6–10	0–55	250	Low	Low	Power tools, EV's (Typ. with NMC blend)	Hitachi, Samsung, LG Chem, Toshiba, NEC	Layered spinel

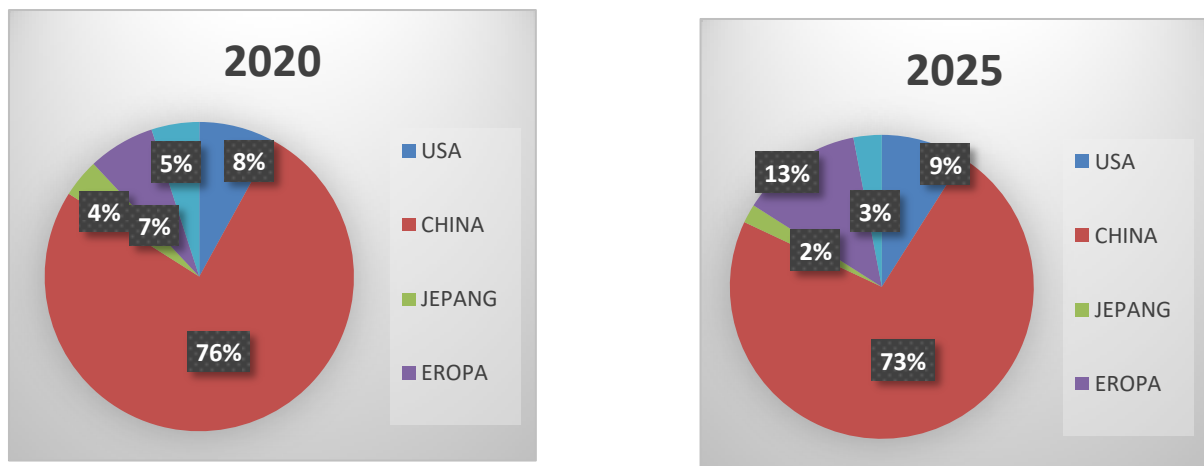
<sup>(i)</sup>Li<sub>1.05</sub>(Ni<sub>0.33</sub>Mn<sub>0.33</sub>Co<sub>0.33</sub>)<sub>0.95</sub>O<sub>2</sub>; <sup>(ii)</sup>Li<sub>1.05</sub>(Ni<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.3</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>0.95</sub>O<sub>2</sub>; <sup>(iii)</sup>Li<sub>1.05</sub>(Ni<sub>0.6</sub>Mn<sub>0.2</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>0.95</sub>O<sub>2</sub>; <sup>(iv)</sup>Li<sub>1.05</sub>(Ni<sub>0.8</sub>Mn<sub>0.1</sub>Co<sub>0.1</sub>)<sub>0.95</sub>O<sub>2</sub>; <sup>(v)</sup>LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub>; <sup>(vi)</sup>LiFePO<sub>4</sub>; <sup>(vii)</sup>Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>; <sup>(viii)</sup>LiMn<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Tabel 2.1 Karakteristik Baterai Berdasarkan Senyawa Kimia Baterai Lithium-Ion**  
Sumber: R. Nealer, (2020)

Baterai NMC, NCA, LFP, dan LMO dengan anoda graphite biasanya diperkirakan bertahan selama 1000 – 3000 siklus atau lebih. 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 baterai LFP-LTO menawarkan masa pakai yang lebih lama (5000+) dengan mengorbankan energi spesifik, yang lebih rendah dari pada semua jenis LIB lainnya. Baterai NCA-graphite mencapai energi spesifik tertinggi, tetapi menonjol karena peringkat keamanannya yang relatif buruk, dengan suhu lari termal yang jauh lebih rendah dari pada 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 meningkat kan densitas energi dibandingkan baterai dengan anoda graphite.

## 2.8 Peran Baterai *Li-Ion*

Permintaan baterai *Li-ion* untuk menggerakkan kendaraan listrik dan penyimpanan energi telah mengalami pertumbuhan eksponensial yang meningkat dari 0,5 gigawatt/jam pada tahun 2010, menjadi sekitar 526 gigawatt/jam pada satu dekade kemudian dan di prediksi permintaan diproyeksikan meningkat 17 kali lipat pada tahun 2030. Berikut merupakan Gambar 2.6 Kapasitas produksi baterai lithium-ion berdasarkan lokasi pabrik



**Gambar 2.6 Kapasitas Produksi Baterai Li-ion Berdasarkan Lokasi Pabrik**  
Sumber: Pérez-Villar S, (2021)

Gambar 2.6 menjelaskan bahwa kapasitas produksi baterai Li-ion yang ditugaskan berdasarkan lokasi pabrik, Benua Asia mendominasi rantai pasokan baterai Li-ion terutama di Tiongkok, di mana produsen baterai Li-ion Tiongkok (CATL) adalah salah satu pemimpin dunia dalam baterai Lithium-Ion. Tiongkok adalah negara produsen baterai terbesar dengan

567 GWh, hampir sepuluh kali lebih besar dari negara kedua, Amerika Serikat. dimiliki Eropa. Keberhasilan Tiongkok dihasilkan dari permintaan baterai dalam negeri yang besar, penguasaan lebih dari 70% penyulingan bahan mentah grafit dunia, dan kapasitas produksi sel dan komponen sel yang sangat besar. Korea dan Jepang menempati peringkat nomor dua dan tiga dalam rantai pasokan baterai Li-ion. Meskipun kedua negara merupakan pemimpin dalam manufaktur baterai dan komponen sel (LG Energy Solution, Samsung SDI, SK Innovation, Panasonic), mereka tidak memiliki pengaruh yang sama dalam pemurnian dan penambangan bahan mentah seperti Tiongkok.

Baterai Li-ion telah menjadi teknologi pilihan untuk banyak aplikasi, hasilnya, perusahaan banyak menarik pemain, contohnya laboratorium penelitian dan pengembangan, produsen komponen sel, produsen sel dan paket baterai, serta integrator sistem. Pasar baterai Li-ion terdiri dari beberapa aplikasi teknologi baterai, dengan target dan peran yang sedikit berbeda, sehingga setiap aplikasi dapat dilayani dengan baik oleh teknologi baterai Li-ion tertentu. Tiga aplikasi nyata termasuk kendaraan listrik, perangkat elektronik, dan penyimpanan energi berbasis baterai stasioner mencakup sebagian besar pasar baterai Li-ion saat ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 Pengaplikasian utama baterai Li-ion (kendaraan listrik, perangkat elektronik, dan penyimpanan energi stationer berbasis baterai).



**Gambar 2.7 Pengaplikasian Utama Baterai Li-ion.**  
**Sumber: Pérez-Villar S, (2021)**

Gambar 2.7 menjelaskan tentang baterai Li-Ion yang memainkan peran khusus dalam berbagai aplikasi, HEV yang memiliki mesin pembakaran internal tradisional berbasis kendaraan, dimana sistem penggeraknya dipadukan dengan motor listrik kecil yang digerakkan oleh baterai dan diisi melalui pengereman *regenerative*, sehingga kapasitas baterai Li-Ion *relative* lebih kecil. Dibandingkan dengan HEV, baterai PHEV dapat diisi juga dengan menghubungkan listrik eksternal, sehingga PHEV membutuhkan kapasitas energi yang jauh lebih besar. Dalam konteks ini, baterai Li-Ion membutuhkan kepadatan energi yang

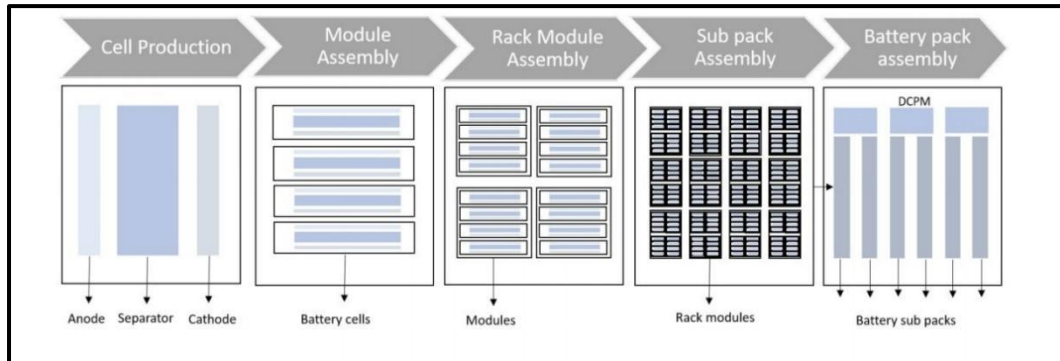
lebih baik dan dana biaya modal yang lebih rendah. Kemudian CEV seperti e-bus yang sistem baterainya relatif lebih besar dan dampak kesalahan baterai seperti pelarian termal akan menjadi lebih parah, baterai Li-ion di sini telah meningkatkan persyaratan keselamatan. Selain itu, karena e-bus pada umumnya perlu sering diisi dayanya, masa pakai baterai Li-ion di sini juga menjadi lebih penting dibandingkan casing xEV lainnya.

EV (*electric vehicle*) adalah kendaraan listrik yang menggunakan mesin penuh tanpa mesin pembakaran internal, serta memberikan jangkauan yang cukup untuk kepadatan energi yang lebih tinggi, dan biaya modal yang rendah. EV juga tidak dapat mengandalkan mesin pembakaran internal, melainkan baterai Li-ion harus menghadirkan keandalan yang tinggi dan masa pakai yang lama selama 1000 siklus.

Pada baterai Li-ion, kunci umur panjang, efisiensi, keandalan, dan keamanan terletak pada pengelolaan baterai yang efisien pada berbagai tingkat pengoperasian. Untuk aplikasi elektrifikasi transportasi seperti EV, fungsi dasar utama manajemen baterai meliputi akuisisi data baterai, pemodelan baterai, estimasi status baterai, prognostik penuaan baterai, diagnosis kesalahan baterai, pengisian daya baterai, dll. Secara umum, semua solusi manajemen baterai mengandalkan kualitas data baterai yang dikumpulkan. Kecepatan pengambilan sampel, keakuratan pengukuran, dan pra-pemfilteran data merupakan elemen kunci awal untuk menentukan kinerja pengelolaan baterai. Dalam konteks ini, sistem manajemen baterai biasanya memerlukan berbagai jenis sensor untuk mengukur data arus, tegangan, dan suhu baterai. Selain itu, beberapa informasi status internal baterai seperti status pengisian daya (SoC), status daya (SoP), dan status kesehatan (SoH) sulit diukur secara langsung, oleh karena itu berbagai algoritma penyaringan dan estimasi seperti filter Kalman dan variannya, filter partikel (PF), dan jaringan saraf (NN) digunakan untuk memperoleh informasi dari keadaan ini (Badmos O, 2020). Selain itu, informasi penuaan baterai seperti lintasan penurunan kapasitas lebih lanjut dan sisa masa pakai perlu diprediksi untuk mengurangi kecemasan pengguna kendaraan listrik dalam hal jarak tempuh. Prioritas utama manajemen baterai lainnya adalah diagnosis kesalahan untuk memastikan keamanan baterai, yang berarti bahwa setiap kegagalan kritis harus dideteksi atau sistem baterai harus dimatikan jika terjadi kesalahan. Untuk mencapai manajemen pengisian daya yang cepat, aman, dan efisien, strategi pengisian daya baterai dengan kemampuan menangani berbagai tujuan yang saling bertentangan dan memenuhi batasan pengoperasian baterai juga perlu dirancang dengan cermat (Lai X, 2021).

## 2.9 Pembuatan Baterai Li-Ion

Pada tahap proses pembuatan baterai lithiun-ion, tahap produksi mencakup seluruh proses dan aktivitas dalam pembuatan sistem baterai mulai dari sel baterai hingga paket baterai jadi. Tahap produksi dapat dibagi menjadi lima langkah: produksi sel baterai, perakitan modul baterai, perakitan modul rak, perakitan sub-pack, dan perakitan pak baterai.



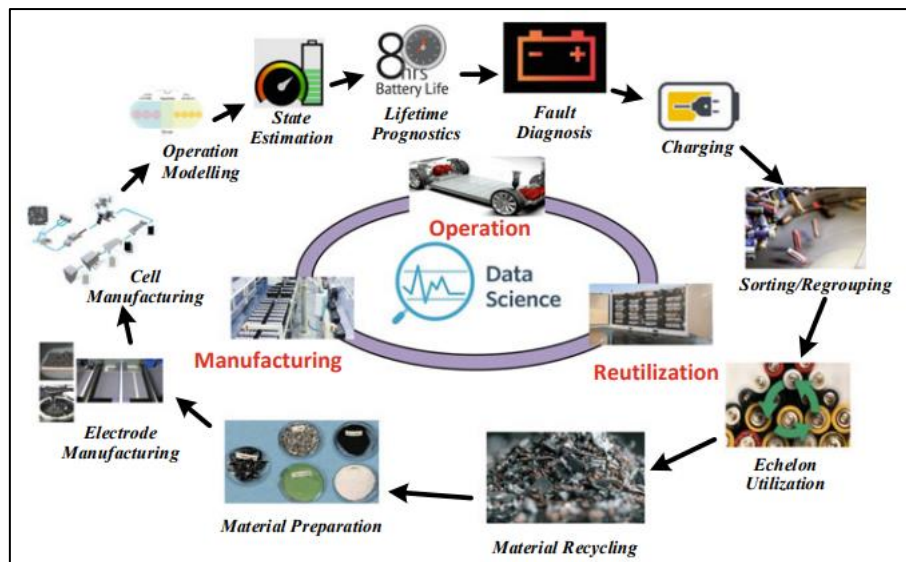
**Gambar 2.8 Tahap Pembuatan Baterai Lithium-ion**

(Sumber: Heimes, 2019)

Pada Gambar 2.8 Sel baterai melibatkan tiga proses utama yaitu, pembuatan elektroda, perakitan sel, dan penyesuaian sel (Heimes et al, 2019). Katoda terdiri dari pengumpulan arus alumunium yang menghubungkan bahan aktif. Desain anoda yang paling umum adalah grafit yang dipasang pada pengumpul arus tembaga. Bahan yang digunakan dalam elektrolit seringkali berupa litium yang dicampur dengan pelarut organik (Nordelof et al, 2019). Separator berfungsi sebagai isolasi listrik antar elektroda yang terbuat dari bahan polipropilen (Zubi et al, 2019). Selanjutnya baterai dirakit menjadi beberapa sel baterai yang mencakup struktur mekanis, sub paket, dan modul baterai yang menampung sel baterai. Terdapat komponen pasif pada baterai yang terdiri dari struktur mekanik, sistem pendingin, konduktor internal, kabel, konektor eksternal, papan sensor, unit kontrol, dan penutup mekanis pelindung (Heimes et al, 2019). Selanjutnya baterai disusun menjadi beberapa rak modul, dimana baterai melalui proses kompres dan ditumpuk bersama dengan perekat. Perakat berfungsi sebagai isolator listrik dan termal (Heimes et al, 2019). Selanjutnya baterai ditutup dan disusun menjadi beberapa sub pak, dengan pengelasan laser bus bar dari tembaga berlapis timah ke sel dengan mesin las berkekuatan 1.000-4.000 W. Laser memanaskan pengumpul arus dan bus bar hingga keduanya menyatu (Heimes et al, 2019). Kemudian modul diuji untuk mengetahui ketidakaturan eksternal, fungsionalitas perangkat, status pengisian daya, pengukuran resistensi, dan kebocoran. Setelah lolos uji, penutup alas akan dilas dan diberikan label (Heimes et al, 2019).

## 2.10 Masa Pakai Baterai Li-Ion

Masa pakai baterai terdiri dari tiga tahap utama, yaitu pembuatan baterai, pengoperasian baterai, dan pemanfaatan kembali baterai. Pembuatan baterai berkaitan dengan cara proses dibuatnya, tahapannya adalah persiapan bahan, pembuatan elektroda, dan pembuatan sel. Manufaktur baterai dapat secara langsung mempengaruhi sifat-sifat produk antara lain seperti rasio volume dan ketebalan elektroda, yang selanjutnya menentukan kinerja awal produk baterai. Lini produksi baterai secara keseluruhan perlu dikelola dengan baik untuk menghasilkan arsitektur elektroda yang sesuai, sehingga menjamin konduktivitas listrik dan ionik yang baik dengan pengumpul arus meskipun rasio volume aditif rendah. Setelah membuat baterai dengan kapasitas 100%, baterai tersebut akan dioperasikan pada aplikasi berbeda dengan kebutuhan energi atau daya yang tinggi, dimana nilai kapasitas baterai akan menurun secara bertahap, karena baterai Li-ion dengan nilai kapasitas di atas 80% cocok untuk mendukung tenaga dan energi kendaraan listrik (EV), proses penurunan kapasitas baterai dari 100 menjadi 80% didefinisikan sebagai tahap kedua dari masa pakai baterai penuh di buku ini, yang dinamakan tahap operasi. Selama manajemen pengoperasian baterai, strategi lanjutan untuk berbagai aspek seperti estimasi status baterai, prognostik masa pakai baterai, dan kesalahan baterai. Berikut merupakan Gambar 2.9 Diagram skema masa pakai baterai penuh.



Gambar 2.9 Diagram skema masa pakai baterai penuh.

Sumber : Badmos O, (2022)

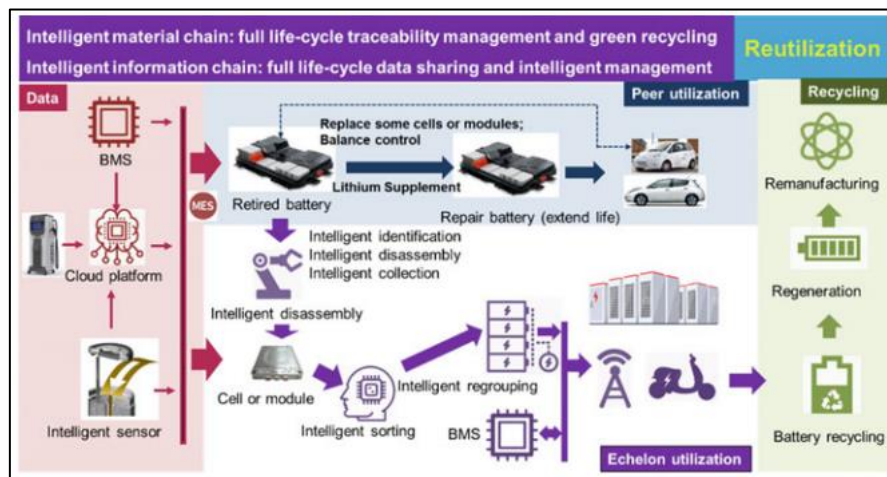
Gambar 2.9 menjelaskan bahwa diagnosis dan pengisian baterai perlu dirancang dengan cermat untuk memastikan efisiensi baterai, kinerja dan keselamatan. Ketika kapasitas baterai menurun dibawah 80% dari kapasitas nominalnya, baterai tersebut tidak cocok untuk

aplikasi kendaraan listrik. Pada kasus ini, baterai perlu dihentikan dari kendaraan listrik dan memasuki tahap ketiga dari masa pakai baterai penuh, yang disebut tahap pemanfaatan kembali. Harus diketahui bahwa baterai yang dihentikan dari kendaraan listrik juga memiliki nilai ekonomi atau lingkungan yang tinggi, yang dapat digunakan dalam banyak aplikasi masa pakai baterai seperti energi jaringan pintar penyimpanan dan transportasi berkecepatan rendah, cara terbaik untuk membuang baterai yang sudah tidak digunakan adalah melakukan pemanfaatan eselon terlebih dahulu dan kemudian mendaur ulang bahan, yang dapat memaksimalkan nilai baterai dan mempromosikan kesehatan dan keberlanjutan pengembangan baterai. Oleh karena itu, selama manajemen pemanfaatan kembali baterai, nilai sisa baterai yang sudah pensiun akan dievaluasi dengan menggunakan riwayat baterai data atau data uji. Berdasarkan informasi nilai sisa yang diperoleh, baterai tersebut kemudian akan disortir dan dikelompokkan kembali untuk pemanfaatan eselon yang aman, nilai sisa seperti kapasitas baterai ini akan terus berkurang selama proses penggunaan kembali baterai. Ketika nilai sisa baterai yang berkurang secara bertahap tidak dapat dipenuhi persyaratan aplikasi masa pakai baterai yang berbeda, berbagai solusi daur ulang material akan dilakukan untuk membantu memulihkan material berharga, mewujudkan mendaur ulang sumber daya yang berharga, mengurangi dampak pengolahan limbah terhadap lingkungan, dan mengurangi pengembangan dan konsumsi sumber daya alam. Kemudian bahan daur ulang ini dapat digunakan kembali untuk pembuatan baterai. Berdasarkan pembahasan di atas dalam pembuatan, pengoperasian, dan pemanfaatan kembali, merupakan lingkaran loop tertutup untuk masa pakai baterai penuh. Untuk memastikan tinggi kinerja baterai dan memanfaatkan baterai sepenuhnya selama masa pakai penuhnya proses-proses ini dalam masa pakai baterai harus dikelola dengan baik. Di sisi lain, selama masa pakai baterai penuh, banyak data terkait perilaku baterai akan dihasilkan. Dengan bantuan data berharga ini dan alat ilmu data yang canggih, berbagai solusi berbasis ilmu data dapat dirancang dan dikembangkan untuk memenuhi berbagai persyaratan manajemen masa pakai baterai.

Baterai Li-ion telah menjadi sumber tenaga utama di kendaraan listrik. Ketika kapasitas baterai berkurang hingga sekitar 80% dari kapasitas awalnya, baterai tersebut perlu dihentikan dari kendaraan listrik untuk memastikan keselamatan. Dengan perkembangan kendaraan listrik yang eksplosif, semakin banyak baterai yang dihentikan dari kendaraan listrik. Cara membuang baterai bekas dengan aman dan andal telah menjadi masalah global. Baterai bekas ini mempunyai nilai ekonomi dan lingkungan yang cukup besar. Di satu sisi, meskipun baterai ini tidak dapat digunakan pada kendaraan listrik, baterai ini dapat digunakan pada kondisi dengan persyaratan keselamatan yang lebih rendah dibandingkan



kendaraan listrik, seperti daya penyimpanan energi dan catu daya siaga. Pemanfaatan sekunder ini disebut pemanfaatan eselon. Di sisi lain, baterai Li-ion memiliki sifat sumber daya yang kaya, karena mengandung sejumlah besar logam berharga. Jika logam berharga ini didaur ulang, penambangan bijih mentah dapat dikurangi, yang memiliki nilai ekonomi dan lingkungan yang besar. Terlihat bahwa baterai Li-ion yang sudah tidak digunakan lagi dapat digunakan kembali, dan pemanfaatan kembali mencakup pemanfaatan eselon dan daur ulang material. Berikut merupakan Gambar 2.10 Diagram Skema pemanfaatan keblai baterai.



**Gambar 2.10 Diagram Skema Pemanfaatan Kembali Baterai**  
Sumber: Chen B, (2022)

Gambar 2.10 menjelaskan bahwa baterai yang dihentikan dari EV memiliki dua jalur teknis: (a) Jika kinerja dan konsistensi baterai baik, baterai dapat diperbaiki dan digunakan kembali melalui beberapa cara teknis. Metode umum termasuk penggantian beberapa modul atau sel, penyeimbang, suplemen litium, dll. (b) Untuk paket baterai dengan perbedaan status kesehatan baterai yang besar, diperlukan pemanfaatan eselon. Proses pemanfaatan eselon dibagi menjadi tiga bagian: pembongkaran baterai, penyortiran baterai, dan pengelompokan kembali baterai. Mereka dijelaskan sebagai berikut:

### 1. Pembongkaran baterai

Pemanfaatan tingkat paket bukanlah skema yang baik. Umumnya, paket baterai perlu dibongkar hingga ke tingkat modul atau sel. Saat ini, sebagian besar pembongkaran dilakukan secara manual, yang memerlukan biaya tenaga kerja tinggi dan bahaya bahan kimia. Pembongkaran otomatis oleh robot merupakan arah yang penting.

### 2. Penyortiran baterai

Tujuannya adalah untuk mengevaluasi nilai sisa baterai. Data historis baterai merupakan sumber berharga untuk evaluasi kinerja baterai. Jika baterai memiliki data historis yang tersedia, status baterai dapat diperoleh dengan mudah. Sebaliknya, baterai perlu diuji

untuk mengevaluasi kinerja baterai, yang memakan waktu dan energi. Oleh karena itu, sangat penting untuk membangun platform data siklus hidup baterai Li-ion.

### 3. Pengelompokan ulang baterai

Pada tahap ini, sel atau modul yang telah diurutkan dikelompokkan kembali berdasarkan skenario pemanfaatan eselon. Ada banyak parameter untuk mencirikan kinerja baterai. Cara mengelompokkan kembali baterai ini adalah masalah teknis. Selain itu, baterai yang dikelompokkan kembali perlu dikelola oleh sistem manajemen baterai untuk masa pakai sekunder. Keamanan baterai selama penggunaan sekunder merupakan masalah utama yang harus diperhatikan etika baterai dipensiunkan untuk kedua kalinya dari skenario pemanfaatan eselon, maka akan memasuki masa daur ulang baterai. Saat ini, terdapat banyak skema daur ulang baterai, di antaranya pirometalurgi dan hidrometalurgi yang lebih umum. Mengembangkan daur ulang ramah lingkungan dengan konsumsi energi rendah, polusi rendah, dan seluruh komponen merupakan arah yang penting. Ada dua jalur teknis dalam tahap daur ulang material: (a) regenerasi langsung. Komponen dari baterai bekas diolah secara kimia dan fisik secara langsung untuk mengembalikan kinerjanya. Cara ini memiliki keekonomian yang bagus, namun teknologinya masih matang. pembuatan ulang baterai. Baterai bekas didaur ulang sebagai bahan pembuatan baterai baru. Singkatnya, pemanfaatan kembali baterai memiliki dua rantai: material dan rantai informasi. Tren perkembangan rantai material adalah manajemen kemampuan penelusuran siklus hidup penuh dan daur ulang ramah lingkungan, serta tren perkembangan informasi rantai adalah berbagi data siklus hidup penuh dan manajemen cerdas.

## 2.11 Integrasi Algoritma Machine Learning dalam Analisis LCA

Teori ini mencakup penggunaan berbagai algoritma machine learning seperti regresi, klasifikasi, dan clustering untuk menganalisis data LCA yang kompleks. Algoritma ini dapat membantu dalam mengidentifikasi pola yang tersembunyi dalam data, memprediksi dampak lingkungan, dan mengoptimalkan proses LCA secara keseluruhan. Integrasi Algoritma Machine Learning dalam Analisis LCA baterai lithium dapat menjadi fondasi yang kuat untuk menggali wawasan yang lebih dalam tentang dampak lingkungan teknologi ini. Beberapa aspek penting dari teori ini meliputi (Ma'rifah, 2024)

1. Pemilihan Algoritma yang Tepat: Tergantung pada jenis data dan tujuan analisis, peneliti harus memilih algoritma machine learning yang paling sesuai. Misalnya, regresi linear atau regresi non-linear dapat digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel input dan output dalam konteks LCA baterai lithium.

2. Analisis Pola: Algoritma machine learning seperti clustering dapat membantu dalam mengidentifikasi pola yang mungkin tersembunyi dalam data LCA. Ini dapat membantu dalam memahami korelasi antara faktor-faktor yang berbeda dan mengidentifikasi kelompok baterai lithium dengan dampak lingkungan yang serupa.
3. Prediksi Dampak Lingkungan: Algoritma machine learning, khususnya model prediktif seperti regresi, dapat digunakan untuk memprediksi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium berdasarkan faktor-faktor yang terlibat. Misalnya, model dapat dipelajari untuk memprediksi emisi gas rumah kaca atau penggunaan energi berdasarkan jenis bahan baku atau proses produksi.
4. Optimasi Proses LCA: Algoritma machine learning dapat digunakan untuk mengoptimalkan proses LCA secara keseluruhan. Ini dapat mencakup identifikasi variabel yang paling berpengaruh dalam analisis, peningkatan efisiensi komputasi, atau pengembangan model yang lebih kompleks untuk memperhitungkan aspek-aspek tambahan dari siklus hidup baterai lithium.
5. Validasi dan Evaluasi Kinerja: Penting untuk melakukan validasi dan evaluasi kinerja algoritma machine learning yang digunakan dalam analisis LCA. Ini melibatkan penggunaan teknik seperti validasi silang atau pengujian out-of-sample untuk memastikan bahwa model dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan.
6. Interpretasi Hasil: Selain menghasilkan prediksi atau klasterisasi, penting untuk dapat menginterpretasikan hasil analisis dengan benar. Ini melibatkan pemahaman tentang bagaimana faktor-faktor tertentu mempengaruhi dampak lingkungan baterai lithium dan implikasi dari temuan tersebut untuk pengambilan keputusan.

## 2.12 Pengembangan Model Prediktif

Teori ini berfokus pada pengembangan model AI yang dapat memprediksi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium berdasarkan faktor-faktor seperti jenis bahan, metode produksi, transportasi, dan pembuangan. Model ini dapat membantu dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap dampak lingkungan dan merencanakan strategi mitigasi yang sesuai. Dalam teori pengembangan Model Prediktif untuk memprediksi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium, beberapa aspek kunci yang perlu dipertimbangkan meliputi (Fatiha, 2024)

1. Variabel Input: Model harus mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat mempengaruhi dampak lingkungan baterai lithium, termasuk jenis bahan baku yang digunakan, proses produksi, transportasi selama siklus hidupnya, dan metode pembuangan atau daur ulang.
2. Data Training: Pengembangan model prediktif membutuhkan kumpulan data yang representatif dan luas yang mencakup berbagai kondisi produksi dan lingkungan. Data ini harus mencakup informasi tentang konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, penggunaan air, dan parameter lingkungan lainnya yang relevan.
3. Pemilihan Algoritma: Berbagai algoritma machine learning seperti regresi, pohon keputusan, atau jaringan saraf tiruan dapat digunakan untuk mengembangkan model prediktif. Pemilihan algoritma yang tepat tergantung pada kompleksitas data dan jenis prediksi yang diinginkan.
4. Validasi Model: Penting untuk melakukan validasi model menggunakan data independen untuk memastikan bahwa model dapat memberikan prediksi yang akurat dan dapat diandalkan. Ini melibatkan penggunaan teknik seperti validasi silang dan pengujian eksternal.
5. Interpretasi Hasil: Model harus mampu memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang faktor-faktor yang berkontribusi terhadap dampak lingkungan baterai lithium. Ini dapat mencakup analisis sensitivitas untuk mengidentifikasi variabel yang paling mempengaruhi prediksi, serta visualisasi data untuk memudahkan interpretasi.
6. Penyempurnaan dan Iterasi: Model prediktif harus terus diperbarui dan disempurnakan seiring dengan bertambahnya data dan peningkatan pemahaman tentang proses dan faktor yang mempengaruhi dampak lingkungan baterai lithium. Ini memungkinkan model untuk tetap relevan dan akurat seiring waktu.

## **2.13 Tahapan Melakukan LCA Sesuai Standar ISO 14040/44**

Tahapan LCA sesuai dengan standar ISO 14040/44 mencakup empat langkah utama yang saling terhubung:

1. Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup

Tahap pertama dalam LCA adalah menetapkan tujuan yang jelas serta cakupan analisis. Ini meliputi menentukan produk atau proses yang akan dievaluasi, menetapkan batasan sistem (misalnya dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir), dan mengidentifikasi tujuan spesifik yang ingin dicapai dengan melakukan LCA. Definisi

yang tepat pada tahap ini sangat penting karena akan mempengaruhi seluruh proses analisis yang akan dilakukan.

## 2. Inventarisasi Data

Setelah tujuan dan ruang lingkup ditetapkan, langkah berikutnya adalah mengumpulkan data yang relevan untuk setiap tahap siklus hidup produk atau proses yang dievaluasi. Data ini mencakup informasi mengenai input (seperti bahan baku, energi, dan air) dan output (seperti emisi ke udara, air, dan tanah) dari setiap tahap produksi, penggunaan, dan pembuangan produk. Proses inventarisasi data ini harus dilakukan secara sistematis dan akurat untuk memastikan hasil LCA yang dapat dipercaya.

## 3. Penilaian Dampak

Setelah data terkumpul, langkah berikutnya adalah mengevaluasi dampak lingkungan dari input dan output yang telah diidentifikasi dalam tahap inventarisasi. Penilaian dampak ini melibatkan penggunaan metode dan model matematis yang sesuai untuk menghitung dampak potensial terhadap lingkungan, seperti perubahan iklim, penggunaan sumber daya alam, dan pencemaran lingkungan. Tujuan dari penilaian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengukur dampak yang signifikan dari berbagai tahapan siklus hidup produk atau proses.

## 4. Interpretasi Hasil

Tahap terakhir dalam LCA adalah menganalisis dan menginterpretasikan hasil yang diperoleh dari penilaian dampak. Interpretasi ini mencakup menarik kesimpulan mengenai dampak lingkungan relatif dari berbagai opsi produk atau proses, mengidentifikasi faktor kritis yang mempengaruhi hasil, serta menyusun rekomendasi untuk mengurangi dampak lingkungan atau meningkatkan efisiensi produk atau proses yang dievaluasi. Hasil interpretasi ini harus disampaikan secara jelas dan dapat dimengerti kepada para pemangku kepentingan yang berbeda, termasuk manajemen perusahaan, regulator, dan masyarakat umum.

Dengan mengikuti tahapan ini sesuai dengan standar ISO 14040/44, organisasi dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang dampak lingkungan dari produk atau proses mereka, dan mampu mengambil keputusan yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab secara lingkungan.

### **2.13.1 Manfaat Penerapan Standar ISO 14040/44**

Penerapan standar ISO 14040/44 dalam Analisis Siklus Hidup (LCA) memberikan sejumlah manfaat yang signifikan bagi organisasi dan industri secara umum:

#### 1. Meningkatkan transparansi dan kredibilitas LCA:

Standar ISO 14040/44 memberikan pedoman yang jelas tentang metodologi dan prosedur yang harus diikuti dalam melakukan LCA. Hal ini meningkatkan transparansi dalam pengumpulan data, analisis dampak lingkungan, dan interpretasi hasil. Dengan adanya standar yang terstruktur, hasil LCA menjadi lebih dapat dipercaya oleh pihak eksternal seperti konsumen, investor, dan regulator.

2. Memastikan konsistensi dan keandalan hasil LCA:

Dengan mengikuti standar yang sama, organisasi dapat memastikan bahwa proses LCA dilakukan secara konsisten dan menghasilkan hasil yang dapat diandalkan. Konsistensi ini penting untuk membandingkan produk atau proses yang berbeda dan untuk mendukung keputusan bisnis yang didasarkan pada informasi lingkungan yang konsisten.

3. Memudahkan perbandingan LCA antar produk:

Standar ISO 14040/44 memfasilitasi perbandingan yang adil dan objektif antara berbagai produk atau proses. Dengan menggunakan metode dan kriteria yang sama dalam LCA, organisasi dapat dengan mudah menilai dampak lingkungan relatif dari produk alternatif atau dari perubahan dalam proses produksi. Ini membantu dalam memilih opsi yang lebih berkelanjutan dari sudut pandang lingkungan.

4. Mendukung pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan:

Salah satu manfaat utama dari LCA adalah memberikan informasi yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan yang berkelanjutan. Dengan memiliki pemahaman yang lebih baik tentang dampak lingkungan dari produk atau proses mereka, organisasi dapat merancang strategi untuk mengurangi jejak lingkungan mereka, meningkatkan efisiensi sumber daya, dan memenuhi tuntutan regulasi yang semakin ketat terkait keberlanjutan lingkungan.

Penerapan standar ISO 14040/44 bukan hanya membantu organisasi dalam mematuhi standar global untuk praktik LCA yang baik, tetapi juga memungkinkan mereka untuk mengambil langkah-langkah konkret menuju praktik bisnis yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

### **2.13.2 Pentingnya Standar ISO 14040/44 untuk LCA yang Efektif dan Berkelanjutan**

Standar ISO 14040/44 memiliki peran krusial dalam mengarahkan dan memastikan implementasi Analisis Siklus Hidup (LCA) yang efektif dan berkelanjutan di berbagai sektor industri. Dengan menyediakan kerangka kerja yang jelas dan konsisten, standar ini membantu organisasi untuk melakukan evaluasi yang komprehensif terhadap dampak lingkungan dari produk dan proses mereka. Hal ini tidak hanya meningkatkan transparansi dan kredibilitas

LCA, tetapi juga memastikan bahwa hasil analisis dapat diandalkan dalam mendukung keputusan bisnis yang berkelanjutan.

Penerapan standar ISO 14040/44 dalam LCA penting untuk memandu organisasi dalam mengidentifikasi dan mengelola risiko lingkungan, serta untuk mengoptimalkan efisiensi sumber daya. Dengan menggunakan standar yang sama, perbandingan antara produk atau proses yang berbeda menjadi lebih objektif dan dapat diandalkan, membantu perusahaan untuk memilih solusi yang lebih ramah lingkungan.

Oleh karena itu, saya mengajak seluruh industri dan organisasi untuk menerapkan standar ISO 14040/44 secara luas dalam praktik LCA mereka. Dengan melakukan hal ini, kita dapat bersama-sama membangun produk dan layanan yang tidak hanya menguntungkan dari segi ekonomi, tetapi juga berkontribusi positif terhadap lingkungan. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan ke dalam proses bisnis kita, kita dapat menciptakan masa depan yang lebih hijau dan berkelanjutan bagi generasi mendatang.

## **2.14 Penetian Terdahulu**

Baterai Li-ion mengubah hidup kita karena kapasitasnya untuk menyimpan kepadatan energi yang tinggi dengan tingkat daya keluaran yang sesuai, sehingga memberikan umur yang panjang. Terlepas dari keuntungan yang nyata, desain baterai Li-ion memerlukan optimasi terus-menerus untuk meningkatkan aspek-aspek seperti biaya, manajemen energi, manajemen termal, bobot, ketahanan, kelayakan tabrakan, dll. Selama periode ini, baterai Li-ion telah digunakan di berbagai bidang seperti perangkat elektronik, rumah pintar, transportasi, dll.

Dua puluh tahun yang lalu, desain kendaraan listrik (EV) dapat berubah karena keterbatasan baterai timbal (asam). Studi dan eksperimen memberikan perspektif baru dalam memperkenalkan teknologi Li-ion. Para ahli mulai mempertimbangkan baterai Li-ion sebagai solusi penyimpanan paling menjanjikan untuk kendaraan listrik masa depan. Selama sepuluh tahun terakhir, baterai Li-ion telah menggantikan baterai timbal (asam) dalam banyak aplikasi, dan pangsa pasar baterai Li-ion pada akhirnya akan melampaui baterai timbal (asam) pada tahun 2027.

Dari tahun 2010 hingga 2023, topik baterai Li-ion muncul di ratusan ribu makalah penelitian. Dengan mencari kata kunci “Li-ion” di *database Scopus*, kita dapat melihat hasil dari sekitar 500.000 makalah dengan peningkatan yang nyata selama dua tahun terakhir. Motivasi yang mendukung penelitian lanjutan ini adalah kebutuhan untuk mencapai baterai yang semakin kecil, modular, hemat biaya, berkelanjutan, berkapasitas tinggi, aman, dan

efisien. Saat ini, penjualan kendaraan listrik meningkat karena keunggulan pencapaian nol emisi dengan kombinasi motor listrik dan baterai Li-ion. Namun, ada banyak diskusi mengenai pengurangan dampak lingkungan yang efektif dan keberlanjutannya. Teknologi Li-ion tidak mencapai tingkat daur ulang yang sama seperti baterai timbal (asam), namun diperkirakan akan terjadi peningkatan yang signifikan dalam laju daur ulang sel Li-ion. Sistem baterai mengandung komponen mekanik, listrik, dan elektronik yang berbeda. Masing-masing harus dipertimbangkan dalam proses desain. Definisi tata letak baterai sangat penting karena aspek ini berdampak langsung pada biaya, pembuangan panas, fase produksi, dan pemrosesan di akhir masa pakainya. Salah satu skema yang paling banyak digunakan dalam tata letak baterai adalah pendekatan modularitas. Bagi beberapa ahli, modularitas baterai dapat mengimbangi tingginya biaya produksi kendaraan listrik karena fleksibilitas dan tahap pemasangan yang disederhanakan.

Klasifikasi yang diusulkan terutama didasarkan pada sejarah perkembangan pendekatan desain. Sekalipun beberapa dokumen dapat masuk dalam lebih dari satu kategori, setiap makalah telah dimasukkan ke dalam satu kategori memperkenalkan perspektif baru dalam desain baterai. Parameter desain utama dapat dioptimalkan dengan pendekatan multi-objektif. Selain itu, algoritma pembelajaran mesin dan aplikasi digital twin meningkatkan desain baterai dan manajemen baterai dengan alat *Machine Learning* (ML). Namun, kompleksitas paket baterai Li-ion memerlukan platform desain multidisiplin yang mencakup alat dan metode berbeda. Berikut beberapa penelitian terdahulu pada penelitian *lifecycle assessment battery lithium* dengan penerapan AI. Salah satu keterbatasan utama baterai Li-ion berkaitan dengan tingginya biaya fabrikasi dan pembelian bagi pengguna akhir, serta yang paling pentingnya belum mementingkan tentang dampak dari pembuatan dan pembuangan baterai yang sebenarnya berpengaruh bagi dari aspek lingkungan, walaupun pada proses penggunaannya memang mengurangi emisi untuk lingkungan.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penulis akan menganalisis praktik-praktik baru dalam metode desain dan manufaktur dengan penerapan LCA untuk baterai lithium yang digunakan oleh mobil listrik (EV). Analisis siklus hidup diperlukan untuk menjamin pengambilan keputusan yang ramah lingkungan untuk sistem penyimpanan energi di masa depan, dengan menggunakan metode LCA berbasis proses dan metode input dan output. Targetnya adalah memberikan efisiensi, kinerja, keamanan, dan bobot yang tinggi pendekatan *zero emission* (*green*) dari hulu sampai hilir atau dari proses pembuatan hingga masa baterai habis (daur ulang). Masalah-masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan Pemodelan LCA, pada penelitian ini model yang digunakan adalah model berbasis AI dengan ML dan optimasi



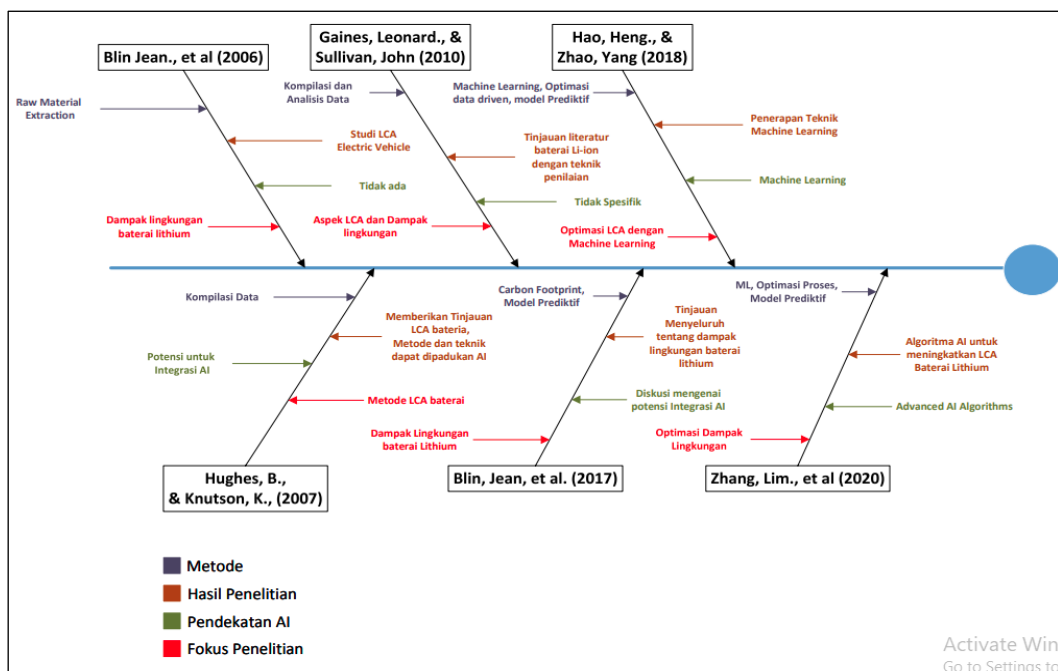
berbasis AI. Model berbasis AI dan ML digunakan sebagai teknik untuk memperbaiki prediksi dampak lingkungan dan mengidentifikasi pola dalam data yang dikumpulkan dari analisis LCA. Model AI yang digunakan adalah Regresi, model ini digunakan untuk optimasi dan pengambil keputusan dinamis dalam konteks LCA, memungkinkan adaptasi model berdasarkan umpan balik analisis dampak lingkungan. Optimasi Berbasis AI digunakan untuk mengoptimalkan berbagai parameter dalam model LCA, termasuk pemilihan material, desain proses dan strategi manajemen akhir hayat (*end-of-life*), dengan model optimasi AI yang dipakai yaitu *reinforcement learning*. Inovasi teknologinya melakukan pengembangan algoritma dan melakukan sistem terintegrasi yang menggabungkan ML dengan LCA, untuk menyediakan solusi untuk analisis dan optimasi dampak lingkungan.

**Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu**

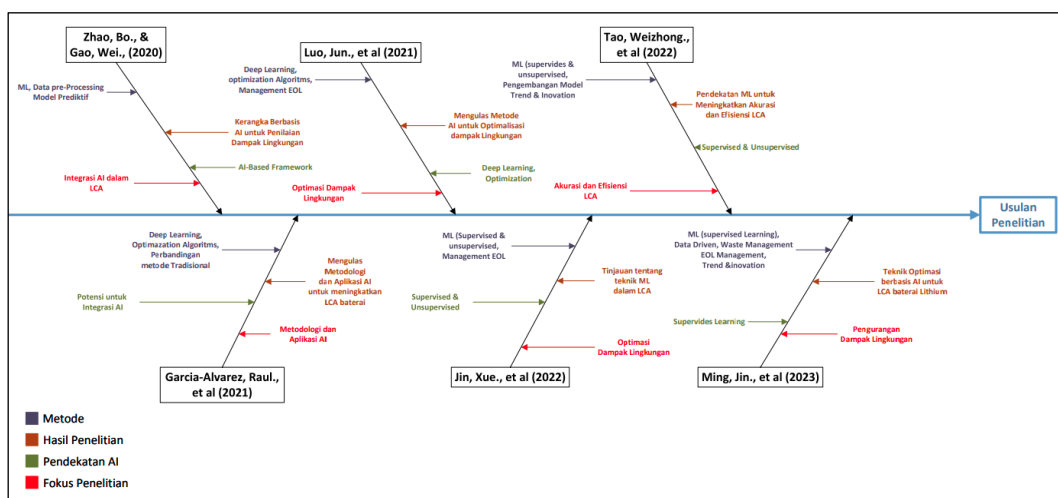
No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Tahun
1	Blin, Jean., et al.	<i>Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles</i>	Raw material extraction	Menyajikan studi LCA untuk baterai lithium-ion dengan fokus pada kendaraan listrik. Meskipun tidak mengintegrasikan AI, artikel ini memberikan basis untuk memahami dampak lingkungan baterai lithium-ion	2006
2	Hughes, B., & Knutson, K.	<i>A Review of Life Cycle Assessment of Batteries</i>	Kompilasi data	Memberikan tinjauan tentang LCA baterai, termasuk metode dan teknik yang dapat dipadukan dengan AI untuk analisis yang lebih efisien	2007
3	Gaines, Leonard L., & Sullivan, John	<i>Literature Review of Lithium-Ion Batteries for Plug-In Hybrid Electric Vehicles</i>	Kompilasi dan Analisis Data	Menyajikan tinjauan literatur tentang baterai lithium-ion, termasuk aspek-aspek yang relevan dengan LCA dan dampak lingkungan	2010
4	Blin, Jean., et al.	<i>Environmental Impact of Lithium-Ion Batteries: A Review</i>	Teknik penilaian Carbon Footprint, Model Prediktif	Tinjauan menyeluruh tentang dampak lingkungan baterai lithium-ion dengan berbagai teknik penilaian, termasuk LCA. Diskusi mengenai potensi integrasi AI	2017
5	Hao, Heng., & Zhao, Yang	<i>Data-Driven Optimization of Battery Life Cycle Assessment Using Machine Learning Techniques</i>	Machine Learning, Optimasi data driven, model prediktif	Membahas penerapan teknik <i>machine learning</i> untuk mengoptimalkan LCA baterai lithium-ion, termasuk teknik optimasi data-driven	2018
6	Zhang, Lin., et al	<i>Optimization of Life Cycle Assessment for Lithium-Ion Batteries Using Advanced Artificial Intelligence Algorithms</i>	Machine Learning, optimasi proses, model prediktif	Menyajikan algoritma AI untuk meningkatkan LCA baterai lithium-ion, membahas optimasi dampak lingkungan.	2020
7	Zhao, Bo., & Gao, Wei	<i>Artificial Intelligence-Based</i>	Machine Learning, data	Memperkenalkan kerangka berbasis AI untuk penilaian	2020

		<i>Framework for Environmental Impact Assessment of Lithium-Ion Batteries</i>	pre-processing, model prediktif	dampak lingkungan baterai lithium-ion, termasuk integrasi dengan proses LCA	
8	García-Álvarez, Raúl., et al.	<i>AI-Enhanced Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries: Methodologies and Applications</i>	Deep Learning, Optimization Algorithms, Perbandingan metode Tradisional	Mengulas metodologi dan aplikasi AI untuk meningkatkan LCA baterai lithium-ion, termasuk teknik dan studi kasus terkini	2021
9	Luo, Jun., et al.	<i>Optimizing Environmental Impact of Lithium-Ion Batteries Using Artificial Intelligence: A Comprehensive Review</i>	Deep Learning, Optimization Algorithms, Management End of Life	Mengulas berbagai metode AI yang digunakan untuk mengoptimalkan dampak lingkungan dari baterai lithium-ion dalam konteks LCA	2021
10	Jin, Xue., et al	<i>Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries with Machine Learning Techniques: A Review"</i>	Machine Learning (Supervised Learning & Unsupervised Learning), Management End of Life, Trend & Inovation	Memberikan tinjauan tentang penerapan teknik <i>machine learning</i> dalam LCA baterai lithium-ion, serta metode untuk mengoptimalkan dampak lingkungan	2022
11	Tao, Weizhong., et al	<i>Machine Learning Approaches to Improve Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries" - Sustainable Materials and Technologies</i>	Machine Learning (Supervised Learning & Unsupervised Learning), Pengembangan model, Trend & Inovation	Meneliti bagaimana pendekatan <i>machine learning</i> dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi LCA baterai lithium-ion	2022
12	Ming, Jin., et al.	<i>Enhancing Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries with AI-Driven Optimization Techniques</i>	Machine Learning (Supervised Learning), Data Driven, Waste Management, End of Life Management Trend & Inovation	membahas teknik optimasi berbasis AI untuk meningkatkan proses LCA baterai lithium-ion, dengan fokus pada pengurangan dampak lingkungan	2023
13	Penelitian Usulan	<i>Sistem Life Cycle Assessment Baterai Lithium untuk Mengoptimasi Dampak Lingkungan Menggunakan Machine Learning</i>	Machine Learning (supervised), Regresi, Reinforcement Learning, Pengembangan Model, Inovation	-	2024

Untuk lebih memahami penelitian usulan yang akan di teliti melihat dari penelitian sebelumnya, digunakanlah Diagram Fishbone untuk menggambarkan berbagai faktor yang mempengaruhi penelitian tentang LCA baterai lithium-ion dengan integrasi AI. Tujuan dari diagram ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengorganisir berbagai elemen penelitian yang berkaitan dengan penerapan AI dalam proses LCA baterai lithium-ion. Diagram ini mencakup metode penelitian, hasil temuan, tahun publikasi, teknik AI yang digunakan, dan fokus utama dari setiap studi untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan dan kontribusi. Berikut merupakan Gambar 2.11 Diagram *Fishbone* Penelitian Usulan.



Gambar 2.11 Diagram *Fishbone* Penelitian Usulan



Gambar 2.11 Diagram *Fishbone* Penelitian Usulan (Lanjutan)

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Objek Penelitian**

Objek penelitian ini berfokus pada penerapan machine learning dalam sistem life cycle assessment untuk baterai lithium-ion, terdiri dari:

1. Baterai *lithium-Ion*

Baterai *lithium-ion* merupakan jenis baterai yang banyak digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel, dan sistem penyimpanan energi. Baterai ini dikenal karena densitas energi yang tinggi dan umur panjangnya. Namun, siklus hidup baterai ini melibatkan beberapa tahap yang dapat mempengaruhi lingkungan, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga daur ulang.

2. Sistem *Life Cycle Assessment* (LCA)

LCA adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk sepanjang siklus hidupnya. Dalam konteks baterai *lithium-ion*, sistem LCA mencakup analisis dampak dari ekstraksi bahan baku (seperti lithium, kobalt, dan nikel), proses produksi, penggunaan, dan akhir masa pakai termasuk daur ulang atau pembuangan.

3. Teknologi *Machine Learning* (ML)

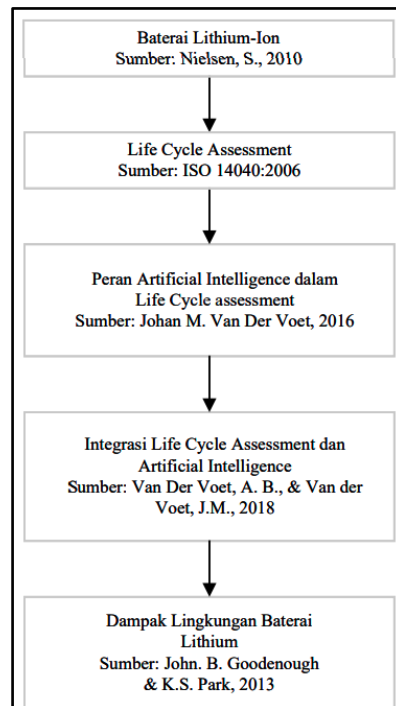
*Machine Learning* adalah cabang dari kecerdasan buatan yang menggunakan algoritma untuk menganalisis data, menemukan pola, dan membuat prediksi atau keputusan berdasarkan data tersebut. Dalam penelitian ini, ML diterapkan untuk mengoptimalkan penilaian dampak lingkungan baterai lithium-ion. Algoritma ML yang digunakan yaitu model regresi, dan *reinforcement learning*.

4. Dampak Lingkungan

Ini mencakup berbagai jenis dampak yang dihasilkan selama siklus hidup baterai lithium-ion, seperti emisi gas rumah kaca, konsumsi energi, penggunaan sumber daya alam, dan potensi pencemaran dari proses produksi serta daur ulang.

### 3.2 Kerangka Teoritis Penelitian

Kerangka teoritis penelitian berisikan konsep-konsep yang bersumber dari teori yang saling berhubungan secara tersistematis (Sugiyono, 2019). Kerangka penelitian dalam penulisan ini digambarkan menggunakan diagram alir. Berikut merupakan Gambar 3.1 Kerangka Teoritis Penelitian.



**Gambar 3.1 Kerangka Teoritis Penelitian**

Penelitian ini didasari oleh teori dasar baterai lithium-ion yang diteliti oleh Nielsen, S., tahun 2010 dengan judul penelitian “*Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*”, dimana baterai lithium-ion kaitannya dengan *life cycle assessment* adalah memiliki tahapan siklus yang dapat dianalisis, terdiri atas ekstraksi dan pengolahan bahan baku, produksi baterai, penggunaan baterai, akhir masa pakai, dan daur ulang. Tahap teori dasar LCA pada penelitian ini bersumber dari ISO 14040:2006 adalah pendekatan yang sistematis untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang terkait dengan setiap tahap siklus hidup produk, mulai dari ekstraksi bahan baku, melalui proses produksi dan penggunaan, hingga akhir masa pakai dan pembuangan atau daur ulang. Terdapat beberapa tahapan LCA menurut ISO 14040:2006, dan tahapan yang menjadi dasar penelitian ini adalah tahap interpretasi, dimana analisis hasilnya untuk menganalisis penilaian dampak keseluruhan produk dan mengidentifikasi area perbaikan.

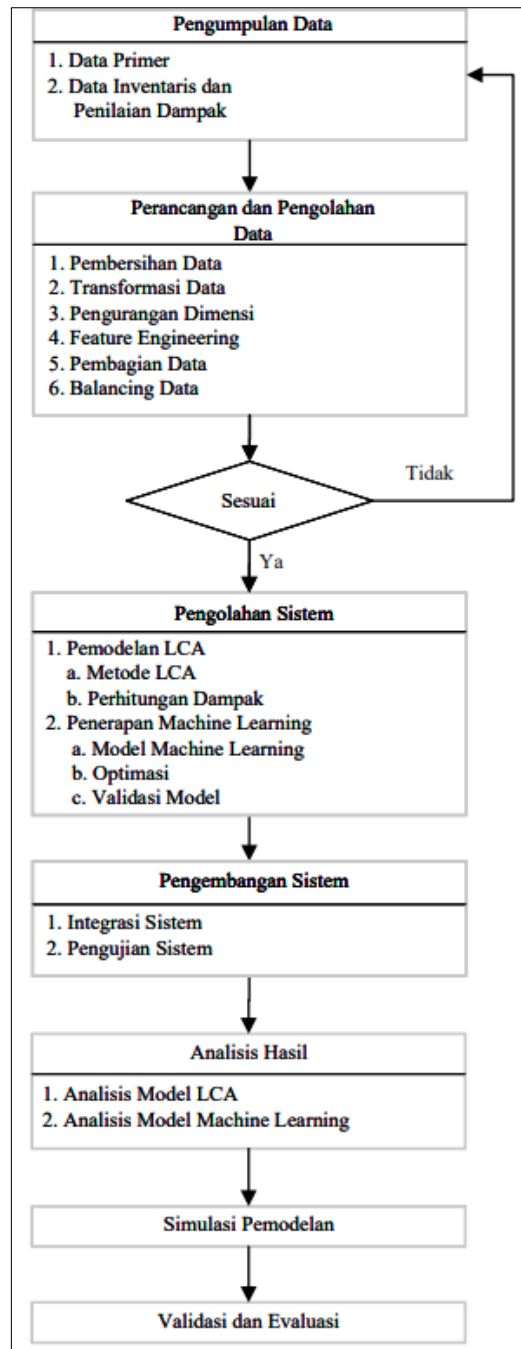
Tahap teori dasar peran artificial intelligence dalam LCA pada penelitian ini bersumber dari J.M. Van Der Voet, tahun 2016 dengan judul penelitian “*Life Cycle Assessment and Decision Support: A Review*”, yang menjelaskan AI memiliki peran penting dalam mengoptimalkan dan memperluas aplikasi LCA, dan menjelaskan AI dalam LCA memiliki tiga peran, yaitu optimasi model dan data, pengembangan dan kalibrasi model, serta penilaian dampak dan analisis sensitivitas. Pada penelitian ini peran yang digunakan adalah optimasi model dan data, pengembangan model, dan penilaian dampak.

Tahap teori dasar integrasi LCA dan AI pada penelitian ini bersumber dari Van Der Voet A.B., dan Van Der Voet J.B., pada tahun 2018 dengan judul penelitian “*Integration of Artificial Intelligence in Life Cycle Assessment: A Critical Review*”, yang menjelaskan bahwa terdapat lima integrasi AI dalam LCA, yaitu Optimasi Pengumpulan Data, *Modeling* dan Analisis, Penilaian Dampak, Interpretasi dan Pengambilan Keputusan, dan tantangan dalam Integrasi AI. Pada penelitian ini integrasi yang digunakan yaitu pengambil keputusan.

Tahap teori dasar mengenai dampak lingkungan baterai lithium pada penelitian ini bersumber dari John. B. Goodenough & K.S Park, pada tahun 2013 dengan judul penelitian “*The Li-Ion Battery: A Perspective*”, yang menjelaskan analisis dampak lingkungan dari produk baterai lithium, yang dapat dibagi menjadi empat tahapan yaitu ekstraksi dan pengolahan bahan baku, proses produksi, penggunaan dan efisiensi energi, dan akhir masa pakai dan daur ulang. Pada penelitian ini teori ini menjadi landasan input-output atau hulu-hilir dari sistem yang akan dibuat,

### **3.1 Tahapan Penelitian**

Tahapan penelitian untuk penilaian siklus hidup baterai lithium dalam kaitannya dengan kecerdasan buatan dan implikasi lingkungan dapat melibatkan serangkaian langkah-langkah penelitian yang dimulai dari pengumpulan data dan diakhiri dengan validasi dan evaluasi, Berikut merupakan Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian.



**Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian.**

## 1. Pengumpulan Data

Langkah awal adalah mengumpulkan data tentang siklus hidup baterai lithium, termasuk pengambilan material, penggunaan, dan pembuangan. Data ini mencakup informasi tentang material baterai, proses produksi, konsumsi energi, dan dampak terhadap lingkungan. Data yang digunakan adalah data primer, dimana data primer dilakukan dengan pengukuran langsung dari proses produksi, penggunaan dan pembuangan baterai lithium.

Data yang diperlukan untuk model AI adalah dataset yang mencakup variabel-variabel yang mempengaruhi dampak lingkungan dari produk baterai, seperti jenis material, proses produksi, pola penggunaan dan masa akhir hidup dan data tersebut harus sesuai dengan standar ISO 14040/44, yang berupa data inventaris dan data penilaian dampak. Data inventaris berisikan informasi mengenai input (seperti bahan baku, energi) dan output (seperti emisi ke udara, air, dan tanah) dari setiap tahap pengambilan material, produksi, penggunaan, dan pembuangan. Data penilaian dampak adalah data hasil evaluasi dampak lingkungan dari input dan output yang telah diidentifikasi dalam tahap inventaris.

## 2. Perancangan dan Pengolahan Data

Dalam tahap ini, dilakukan pengolahan data pre-processing memastikan bahwa data yang digunakan untuk pelatihan model machine learning berkualitas tinggi, konsisten, dan siap untuk dianalisis, berikut merupakan langkah yang dilakukan pada tahap pre-processing:

### a. Pembersihan Data (*Data Cleaning*)

Menghapus data yang hilang dan tidak konsisten, dan penghapusan duplikasi

### b. Transformasi Data

Melakukan normalisasi dan standarisasi dan *encoding* kategori

### c. Pengurangan dimensi (*Dimensionality Reduction*)

Mengurangi jumlah dimensi data untuk menghilangkan fitur yang tidak relevan

### d. *Feature Engineering*

Menciptakan fitur baru dari fitur yang ada untuk meningkatkan kekuatan prediktif model.

### e. Pembagian data

Memisahkan data menjadi set-pelatihan, set-validasi, dan set-pengujian untuk evaluasi model.

### f. *Balancing* data

Mengatasi masalah ketidakseimbangan kelas di dataset.

## 3. Pengolahan Sistem

Pada perancangan sistem terdiri dari pemodelan LCA dan *machine learning*, berikut merupakan penjelasannya:

### a. Pemodelan LCA

- Metode LCA: Menggunakan metode berbasis proses dan *input-output* untuk menghitung dampak lingkungan.
- Perhitungan Dampak: Melakukan perhitungan dampak lingkungan (gas rumah kaca, penggunaan energi, dan limbah)



#### b. Penerapan *Machine Learning*

- Model *Machine Learning*: Pemilihan model *machine learning*, model yang digunakan adalah *reinforcement learning*, model ini digunakan untuk optimasi dan pengambilan keputusan dinamis dalam konteks LCA, memungkinkan adaptasi model berdasarkan umpan balik analisis dampak lingkungan.
- Optimasi: menggunakan teknik optimasi berbasis AI untuk menemukan solusi yang mengurangi dampak lingkungan
- Validasi Model: Menggunakan teknik *cross-validation* untuk mengevaluasi kinerja model.

#### 4. Pengembangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan pengembangan model kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan penggunaan baterai lithium, yang melibatkan pengembangan algoritma untuk mengoptimalkan pengisian daya, penggunaan energi, dan manajemen. Integrasi sistem dengan melakukan integrasi sistem dan pengujian sistem. Integrasi sistem melibatkan penghubungan berbagai modul yang dirancang, integrasi yang efektif memastikan aliran data yang lancar dan proses yang terkoordinasi antar modul. Pengujian sistem merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa semua modul berfungsi dengan benar dan sistem secara keseluruhan bekerja dengan yang diharapkan, dengan alat yang digunakan adalah alat pengujian sistem, dan *logging*.

#### 5. Analisis Hasil

Analisis model siklus hidup dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari siklus hidup baterai lithium. Ini mencakup tahap produksi, distribusi, penggunaan, dan pembuangan. Metode LCA ini akan memberikan pemahaman yang komprehensif tentang dampak lingkungan dari baterai lithium. Analisis model *machine learning* dilakukan dengan mengevaluasi akurasi model, *cross-validation*, dan analisis kesalahan.

#### 6. Simulasi Pemodelan

Model yang dikembangkan akan diuji melalui simulasi dan analisis komputer. Ini akan memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi kinerja model dalam meningkatkan efisiensi penggunaan baterai lithium dan mengurangi dampak lingkungan.

## 7. Validasi dan Evaluasi

Model dan temuan penelitian akan divalidasi menggunakan data empiris dan evaluasi lapangan jika memungkinkan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan akurasi.

### Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

[illegible]

[illegible]

## Daftar Pustaka

- Lai X, Deng C, Tang X. (2022). *Soft Grouping of Retired Lithium-Ion Batteries for Secondary Use Gaussian Mixture Model Based on Impedance Spectroscopy Electrochemistry. Journal of Production Cleaning*, 339-130786.
- Khanna N, Wadhwa J, Pitroda A. (2022). *Lifecycle Assessment of Green initiatives for Sustainable Machinery. Journal Sustainable Materials and Technology*, 32-00413.
- Syafique M, Luo X. (2022). *Lifecycle Assessment of Battery Electric Vehicles from Current and Future Energy Perspectives. Journal of Environmental Management*, 317-125950.
- Lai X, Huang Y, Gu H, Deng C. (2021). *Turning Waste into Wealth a Systematic Review on Echelon Utilization and Material Recovery of the Retired Lithium-Ion Battery. Energy Storage Mater*, 40:96-123.
- J.F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, M. Weil. (2019). *The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – a review, Renewable Sustainable Energy Rev.* 67491–506,
- Nealer, R., Hendrickson, T.P. (2015). *Review of Recent Lifecycle Assessments of Energy and Greenhouse Gas Emissions for Electric Vehicles. Curr Sustainable Renewable Energy Rep* 2, 66–73. <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0033-x>.
- J. F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, M. Weil. (2017). *Renewable Sustainable Energy, Rev* 67: 491.
- Frost & Sullivan. (2022). *Global residential battery energy storage market. Global Stationary*. Frost & Sullivan.
- Sasongko A, Qonita U, Murniati R, Kurniawan C. (2020). Tinjauan Teknologi Sintesis *Graphene-Like-Graphite (GLG)* dari *Green Petroleum Coke (GCP)* sebagai Bahan Anoda Berkapasitas Tinggi untuk Baterai Lithium-Ion.
- Fitzgerald, G., Mandel, J., Morris, J., Touati, H. (2015). *The economics of battery energy storage: how multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. Rocky Mountain Institute*.
- Uzair M, Abbas G, Hosain S. (2021). *Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process. World Electric Vehicle Journal* 12:120.
- Lelie M, Braun T, Knips M, Nordmann H, Ringbeck F. (2023). *Battery Management System Hardware Concepts: An Overview Appl Sci* 8:534.

- Rohman, Fadli. (2020). *Aplikasi Graphene untuk Lithium Ion-Battery*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Jiang J, Zhang G, Zeng X, Su L. (2019). *Apparatus and Method for Detecting Battery state of Health*. U.S Patent: 10,395-757.
- Schmidt, S. B., & Husted, S. (2019). *The Biochemical Properties of Manganese in Plants*. *Journal Plants*, 8 (10), 1-15. Basel: MDPI.
- Xiong, Rui. (2019). *Battery Management Algoritms for Electric Vehicles*. *IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instrument (ICEMI)* 2:94.
- Zhang, Yongzhi. (2019). *Validation and Verification of a hybrid method for remaining useful life prediction of lithium-ion battery*. *journal of cleaner production* 212, pp. 240-249.
- Liu, J & Z, Chen. (2019). *Remaining Usefull Life Prediction of Lithium-ion Battery Based on Health Indicator and Gaussian Process Regression Model*. *IEEE Access* 7. PP 39474-39484.
- Sun, Peiyi (2019). *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles*. *Fire Technology*, PP 1-50.
- Herh, Michael. (2021). *Hyundai Motor's Electric Truck Porter EV Catches Fire While Running*. *Bussineska Korea*. 71926 Page 1.
- Ma'rifah, Enna., Hasna, Ainun Nuurul. (2024). *An Efficient Hybrid Energy Smart System Using Lithium Ion Batteries Integrated with Battery Management System*. *Applied Mechanics and Materials* 918: 121-128
- Northvolt, A. (2024). *Enabling the Future of Energy*. Sumber: [https://northvolt.com/newsroom/Europeaen-backing-for-Northvolt\\_gigafactory-in-sweden](https://northvolt.com/newsroom/Europeaen-backing-for-Northvolt_gigafactory-in-sweden) diakses pada tanggal (25 Februari 2024).
- Heimes, H. Kampker, A. Wessel, S. (2019). *Battery Module and Pack Assembly Process*. Sumber: [https://www.pem.rwthachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaabdqbt](https://www.pem.rwthachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabdqbt) diakses pada tanggal (25 Februari 2024).
- Ellingsen A. (2014). *The Size and Range Effect: Lifecycle Grenhouse Gas Emissions Electric Vehicle*. *Envioiremental Research Letters* 11 (5): 054010.
- Fatiha, I. C., Santosa, S. P., Widagdo, D., & Pratomo, A. N. (2024). *Design Optimisation of Metastructure Configuration for Lithium-Ion Battery Protection Using Machine Learning Methodology*. *Batteries*, 10 (2), 52.
- Muhammad Shafique, Xiaowei Luo. (2021). *Enviroemntal life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective*. *Journal of*

*Enviromental Management*, Volume 303:114050.

- Jun Xu, Zhechen Guo, Ziming Xu, Xuan Zhou, Xuesong Mei. (2023). *A systematic review and comparison of liquid-based cooling system for lithium-ion batteries. eTransportation*, Volume 17, 100242.
- Curran, Mary Ann. (2019). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-1119165353.
- European Commission. (2021). *Guidelines for the Environmental Assessment of Products and Services (Product Environmental Footprint - PEF) Guidelines*. ISBN: 978-92-79-26360-8.
- Ntziachristos, Leonidas, et al. (2019). *Environmental Impacts of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. *Science of The Total Environment*, 645, 1480-1491.
- Wang, Michael Q., et al. (2019). *Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*. *Environmental Science & Technology*, 52(10), 5898-5908.
- Zhang, Qing, et al. (2022). *The Evolution of Data Science Practices in Industry: A Survey. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 34(9), 3378-3391.
- Lohr, Steve. (2021). *Data Science: The Big Picture*. *Data Science Review*, 14(3), 215-232.
- Piatetsky-Shapiro, Peter, & Frawley, William J. (2021). *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*: Springer.
- Yuan, Yao., & Zhao, Xuan. (2023). *Enhancing the Generalization of Deep Neural Networks via Adversarial Training. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 34(2), 580-592.
- He, Kaiming., Zhang, Xiangyu., Ren, Shaoqing., & Sun, Jian. (2022). *Deep Residual Learning for Image Recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5), 2228-2243.
- Jain, Abhinav, & Patel, Kalpesh. (2021). *A Comparative Study of Decision Tree Algorithms for Medical Diagnosis. Journal of Healthcare Engineering*, 2021, Article ID 6612430.
- Bui, Thang D., & Turner, Richard E. (2021). *Gaussian Process Regression for Large Data Sets. Journal of Machine Learning Research*, 22(1), 1-29.
- Blin, J., Ménard, S., & Léonard, R. (2006). *Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*. *Journal of Cleaner Production*, 14(11-12), 1086-1098.
- Hughes, B., & Knutson, K. (2007). *A Review of Life Cycle Assessment of Batteries. Journal of Power Sources*, 165(2), 564-580.
- Gaines, L. L., & Sullivan, J. (2010). *Literature Review of Lithium-Ion Batteries for Plug-In*

- Hybrid Electric Vehicles. Journal of Power Sources*, 195(8), 2378-2387.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.042>.
- Blin, J., Ménard, S., & Léonard, R. (2017). *Environmental Impact of Lithium-Ion Batteries: A Review. Journal of Environmental Management*, 203, 499-510.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.061>.
- Hao, H., & Zhao, Y. (2018). *Data-Driven Optimization of Battery Life Cycle Assessment Using Machine Learning Techniques. Journal of Cleaner Production*, 189, 423-434.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.014>.
- Zhang, L., Liu, X., & Zhao, X. (2020). *Optimization of Life Cycle Assessment for Lithium-Ion Batteries Using Advanced Artificial Intelligence Algorithms. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109626.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109626>.
- Zhao, B., & Gao, W. (2020). *Artificial Intelligence-Based Framework for Environmental Impact Assessment of Lithium-Ion Batteries. Journal of Cleaner Production*, 276, 123237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123237>.
- García-Álvarez, R., Fernández, J. A., & González, J. M. (2021). *AI-Enhanced Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries: Methodologies and Applications. Journal of Environmental Management*, 290, 112586.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112586>.
- Luo, J., Wu, M., & Zhang, L. (2021). *Optimizing Environmental Impact of Lithium-Ion Batteries Using Artificial Intelligence: A Comprehensive Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110320.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110320>.
- Jin, X., Chen, X., & Wang, Y. (2022). *Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries with Machine Learning Techniques: A Review. Journal of Cleaner Production*, 336, 130460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130460>.
- Tao, W., Zhang, Y., & Li, H. (2022). *Machine Learning Approaches to Improve Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries. Sustainable Materials and Technologies*, 30, e00375. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00375>.
- Ming, J., Zhang, Q., & Liu, H. (2023). *Enhancing Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries with AI-Driven Optimization Techniques. Energy Reports*, 9, 891-903.  
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.125>.