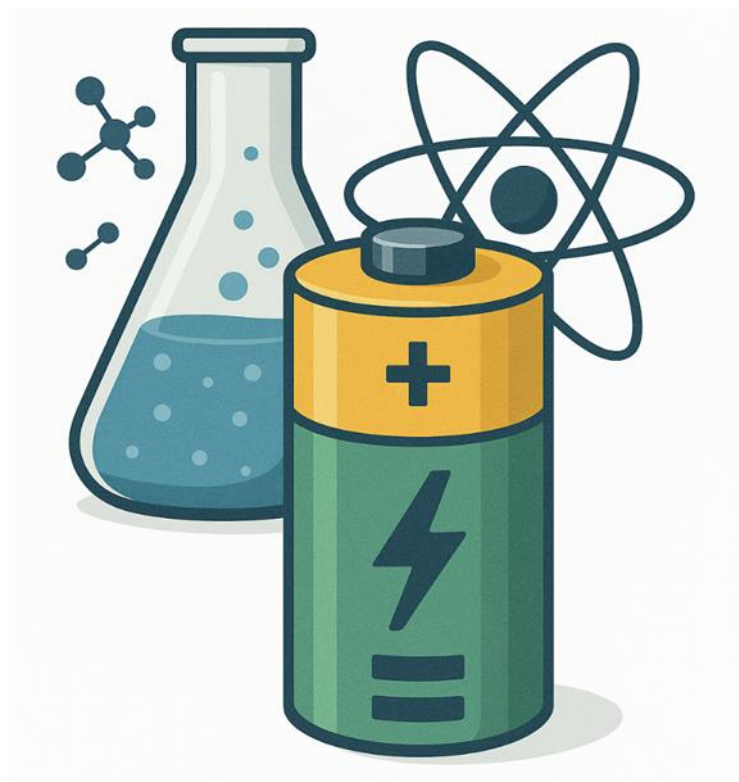

MODUL AJAR KIMIA TEKNIK 2

Baterai 4: Inovasi Energi dan Dampak Lingkungan



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANGKA BELITUNG**

Kawasan Industri Airkantung Sungailiat – Bangka 33211

Telepon (0717) 93586, Faksimile (0717) 93585

Laman: <http://www.polman-babel.ac.id> e-pos: polman@polman-babel.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

MODUL AJAR

Baterai 4: Inovasi Energi dan Dampak Lingkungan

IDENTITAS MODUL

Nama Mata Kuliah : Kimia Teknik 2
Kode Mata Kuliah : KIM208
Semester : ~~Genap~~/Genap Tahun
Pembuat Modul : Sugianto
NIP/~~NIDN~~ : 197507262014041001

Dinyatakan sah dan dapat digunakan.

Menyetujui Koordinator Program Studi,



Idiar

NIP: 198305072014041001

Sungailiat, 23 Juni 2025,



Sugianto

NIP: 197507262014041001

Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Mahasiswa mampu memahami dan menerapkan konsep dasar kimia teknik, meliputi struktur atom, ikatan kimia dan pembentukan material, serta reaksi kimia. Mereka juga dapat mengevaluasi fenomena korosi, degradasi polimer, teknik pelapisan (plating), dan prinsip kerja baterai dalam berbagai aplikasi industri. Dengan keterampilan analitis dan kemampuan pemecahan masalah, mahasiswa dapat mengembangkan solusi berbasis kimia untuk meningkatkan efisiensi serta keberlanjutan material dan sistem teknik.

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK)

Mahasiswa mengetahui perkembangan baterai, cara kerjanya, serta jenis-jenisnya berdasarkan karakteristik elektrokimia. Mereka mampu mengevaluasi manfaat dan dampak baterai dalam sistem teknik, termasuk energi terbarukan dan kendaraan listrik, guna mendukung teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Sub- CPMK (3 x 50menit)

Mahasiswa mampu menjelaskan proses produksi baterai dan dampaknya terhadap lingkungan, mengidentifikasi bahan kimia berbahaya yang digunakan, dan memahami berbagai metode daur ulang serta strategi keberlanjutan berbasis prinsip ekonomi sirkular.

Indikator Pembelajaran:

- ✓ Mampu menganalisis risiko lingkungan dari penggunaan dan pembuangan baterai.
- ✓ Mampu menjelaskan berbagai metode daur ulang

Pokok Bahasan

- Produksi baterai dan dampak lingkungannya
- Bahan kimia berbahaya dalam baterai
- Penggunaan baterai dan tantangan lingkungan
- Pengelolaan akhir masa pakai baterai
- Strategi menuju keberlanjutan baterai
- Metode daur ulang baterai

A. PRODUKSI BATERAI DAN DAMPAK LINGKUNGAN

Baterai kini menjadi komponen vital dalam mendukung transisi menuju energi bersih, khususnya dalam kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi. Namun di balik manfaatnya, proses produksi baterai justru menyisakan berbagai persoalan lingkungan. Emisi gas rumah kaca, limbah kimia berbahaya, serta tingginya konsumsi sumber daya seperti air dan energi, menjadi konsekuensi dari industri yang terus berkembang ini. Tanpa pendekatan berkelanjutan, teknologi yang dirancang untuk mengurangi jejak karbon justru berpotensi memperparah krisis lingkungan global [1].

Masalah lingkungan dalam produksi baterai muncul sejak tahap awal, yakni penambangan bahan baku seperti litium, kobalt, dan nikel. Penambangan ini umumnya dilakukan di wilayah yang rentan secara sosial dan ekologis. Dampaknya mencakup deforestasi, pencemaran air tanah oleh logam berat, serta konflik sosial terkait penguasaan lahan dan praktik kerja yang tidak layak. Selain itu, proses ekstraksi litium di wilayah seperti Argentina dan Bolivia memerlukan jutaan liter air per ton logam yang dihasilkan, yang dapat memicu kelangkaan air bersih di wilayah tersebut [2].

Tahap selanjutnya, yakni pemurnian dan perakitan sel baterai, juga menyumbang emisi karbon dalam jumlah besar—terutama bila prosesnya masih mengandalkan energi dari bahan bakar fosil. Proses ini menghasilkan limbah industri seperti pelarut organik dan sisa logam yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak ditangani dengan sistem pengelolaan limbah yang memadai. Di banyak negara produsen, sistem pengolahan ini belum berkembang secepat laju pertumbuhan industri baterai itu sendiri [3].

Untuk mengurangi dampak negatif tersebut, berbagai solusi tengah dikembangkan. Di antaranya adalah perancangan ulang baterai agar lebih mudah didaur ulang, serta penerapan sumber energi terbarukan dalam proses produksinya. Pendekatan ekonomi sirkular menjadi kunci: baterai tidak lagi dianggap sebagai limbah setelah masa pakainya habis, melainkan sebagai sumber bahan baku sekunder yang bernilai tinggi. Selain itu, transparansi dalam rantai pasok bahan mentah kini mulai diterapkan melalui sistem pelacakan digital dan sertifikasi yang memastikan bahan diperoleh secara etis dan ramah lingkungan [4].

Dengan memperkuat kolaborasi antara industri, pemerintah, dan institusi riset, produksi baterai dapat dikembangkan menjadi lebih bertanggung jawab, baik secara sosial maupun ekologis. Hal ini penting agar peran baterai sebagai solusi energi masa depan tidak menghasilkan dampak buruk yang justru bertentangan dengan tujuan awal transisi energi bersih.

B. BAHAN BERBAHAYA DALAM PRODUKSI BATERAI

Produksi baterai modern, khususnya tipe lithium-ion, melibatkan berbagai bahan kimia yang bersifat toksik dan berpotensi membahayakan kesehatan jika tidak dikelola dengan benar. Salah satu kelompok bahan yang paling signifikan adalah logam berat, terutama kobalt, nikel, dan mangan, yang digunakan sebagai material utama dalam komposisi katoda. Kobalt, misalnya, dapat menimbulkan gangguan pernapasan dan iritasi kulit, serta dikategorikan sebagai karsinogen potensial dalam jangka panjang. Nikel, selain memiliki sifat alergi terhadap kulit, juga termasuk logam

yang dapat menimbulkan kerusakan sistem pernapasan dan telah diidentifikasi sebagai agen karsinogenik oleh berbagai lembaga kesehatan. Mangan, meskipun lebih stabil secara kimia, dapat menyebabkan gangguan neurologis apabila terjadi paparan kronis dalam kadar tinggi, terutama pada pekerja industri [5].

Litium sebagai elemen utama dalam baterai tergolong logam alkali yang sangat reaktif. Dalam bentuk senyawa seperti litium karbonat atau litium heksafluorofosfat (LiPF_6), bahan ini lebih stabil, tetapi tetap memerlukan penanganan hati-hati. LiPF_6 memiliki potensi untuk terurai dan menghasilkan asam fluorida (HF) jika terpapar kelembapan, yang sangat korosif dan berbahaya bagi manusia serta infrastruktur industri [6]. Selain itu, pelarut organik yang digunakan sebagai media elektrolit—seperti etilen karbonat (EC), dimetil karbonat (DMC), dan dietil karbonat (DEC)—memiliki volatilitas tinggi dan dapat menimbulkan risiko kesehatan melalui inhalasi atau kontak langsung. Bahan-bahan ini tidak hanya mudah terbakar, tetapi juga memiliki toksisitas sistemik yang perlu diperhatikan dalam skala industri [7].

Komponen lain yang tak kalah penting adalah bahan pengikat (binder) seperti polyvinylidene fluoride (PVDF), yang digunakan dalam elektrode. PVDF bersifat inert dalam kondisi kering, namun penggunaannya biasanya memerlukan pelarut organik seperti N-methyl-2-pyrrolidone (NMP). NMP merupakan senyawa yang dikenal beracun terhadap hati dan sistem reproduksi serta tergolong sebagai senyawa organik volatil (VOC), yang dapat mencemari udara dalam ruang tertutup [8]. Kombinasi bahan-bahan ini mencerminkan kompleksitas kimiawi dalam produksi baterai yang, meskipun

dirancang untuk mendukung energi berkelanjutan, tetap menimbulkan tantangan serius dalam konteks keselamatan kerja dan pengelolaan bahan berbahaya.

C. BALIK PEMAKAIAN BATERAI: RAMAH EMISI ATAU SEKADAR ILUSI

Baterai sering dilambangkan sebagai lambang kemajuan energi bersih. Kendaraan listrik yang melaju tanpa suara dan perangkat elektronik yang menyala tanpa emisi seolah menjanjikan masa depan yang lebih hijau. Namun, di balik kemudahan dan kesenyapan itu, tersembunyi jejak ekologis yang tak kalah penting untuk diungkap.

Pada kenyataannya, penggunaan baterai tidak sepenuhnya bebas dampak lingkungan. Emisi mungkin tidak terlihat saat pemakaian, tetapi proses pengisian daya masih bergantung pada sumber energi yang digunakan. Jika listrik berasal dari pembangkit berbahan bakar fosil, seperti batu bara atau gas alam, maka emisi karbon tetap terjadi—hanya berpindah tempat, dari knalpot ke cerobong pembangkit [9].

Selain itu, jenis baterai yang digunakan juga menentukan skala dampaknya. Baterai sekali pakai, seperti alkaline atau zinc-carbon, memiliki efisiensi energi rendah dan cenderung cepat menjadi limbah. Tanpa sistem daur ulang yang memadai, baterai-baterai ini dapat mencemari lingkungan melalui logam berat dan elektrolit beracun yang meresap ke dalam tanah dan air [10].

Sementara itu, baterai isi ulang (rechargeable) memang menawarkan efisiensi lebih baik, namun tetap memiliki umur terbatas. Setiap kali daya tahannya menurun dan baterai diganti, sumber daya baru harus

ditambang, diproses, dan dikirim—menyumbang jejak karbon dan konsumsi energi tambahan.

Tak kalah penting, penggunaan baterai juga memiliki risiko keselamatan. Overheating, kebocoran, dan bahkan ledakan masih menjadi isu, terutama bila digunakan secara tidak tepat atau tanpa pengawasan. Dalam konteks ini, edukasi pengguna menjadi kunci untuk mengurangi dampak tidak langsung dari penggunaan sehari-hari.

Langkah nyata dapat dimulai dari pemilihan produk yang menggunakan baterai tahan lama, mendukung program daur ulang, dan memanfaatkan perangkat pengisi daya berbasis energi terbarukan. Dengan begitu, kita tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga bagian dari solusi.

D. TANTANGAN MENGELOLA AKHIR MASA PAKAI BATERAI

Apa yang terjadi ketika baterai mencapai batas usianya? Saat daya tak lagi mampu menyimpan energi dengan optimal, baterai sering kali hanya dianggap sebagai limbah. Namun, di sinilah dilema besar bermula—karena akhir masa pakai baterai bukanlah akhir dari dampaknya.

Setiap tahun, jutaan baterai bekas dari kendaraan listrik, ponsel, dan perangkat elektronik lainnya dibuang. Jika tidak dikelola dengan baik, baterai-baterai ini bisa menjadi ancaman serius. Logam berat seperti kobalt, nikel, dan mangan dapat merembes ke tanah dan mencemari air, sementara risiko kebakaran akibat korsleting internal tetap mengintai di tempat pembuangan akhir [11].

Sayangnya, tingkat daur ulang global untuk baterai, khususnya lithium-ion, masih jauh dari ideal. Banyak negara belum memiliki infrastruktur daur ulang yang efisien. Selain itu, proses ekstraksi kembali material berharga dari baterai bekas sering kali mahal, berbahaya, dan menghasilkan limbah beracun tambahan jika tidak dilakukan dengan hati-hati [12].

Beberapa pendekatan telah dikembangkan, seperti pirometalurgi (pelelehan suhu tinggi) dan hidrometalurgi (pelarutan kimiawi), namun keduanya memiliki kekurangan masing-masing. Pirometalurgi menghasilkan emisi tinggi, sementara hidrometalurgi menghasilkan limbah cair yang perlu diolah ulang [13]. Inovasi seperti teknologi direct recycling dan solusi berbasis bioleaching sedang dikaji untuk mengurangi dampak tersebut, meskipun skalabilitasnya masih menjadi tantangan.

Lebih jauh, logistik pengumpulan baterai bekas juga bukan perkara mudah. Tanpa sistem pengembalian (take-back system) atau insentif ekonomi, banyak baterai tidak pernah sampai ke fasilitas daur ulang. Padahal, riset menunjukkan bahwa pengelolaan end-of-life yang tepat dapat mengurangi konsumsi sumber daya baru secara signifikan [14].

Untuk itu, pendekatan sistemik sangat diperlukan. Diperlukan kebijakan yang mendukung model ekonomi sirkular, integrasi logistik terbalik (reverse logistics), dan kolaborasi lintas sektor—dari produsen, pemerintah, hingga masyarakat. Hanya dengan cara ini, kita bisa memastikan bahwa baterai tidak menjadi bom waktu ekologis di masa depan.

E. STRATEGI MENUJU KEBERLANJUTAN BATERAI

Masa depan energi tidak hanya tentang beralih ke listrik—tetapi tentang bagaimana listrik itu dihasilkan, disimpan, dan digunakan secara bertanggung jawab. Baterai, sebagai penyimpan energi utama di era modern, harus dirancang dan dikelola tidak hanya demi efisiensi teknis, tetapi juga demi keadilan ekologis dan sosial.

Salah satu fondasi utama keberlanjutan baterai adalah pendekatan Design for Recycling (DfR). Desain yang mempertimbangkan kemudahan pembongkaran dan pemisahan material akan sangat membantu proses daur ulang. Ketika produsen mengintegrasikan prinsip DfR sejak tahap perancangan, efisiensi sumber daya meningkat, biaya pengolahan limbah menurun, dan potensi pencemaran dapat ditekan secara drastis [15].

Selain itu, penggunaan energi terbarukan dalam proses produksi dan daur ulang menjadi faktor yang sangat menentukan. Ketika energi bersih seperti surya atau angin digunakan untuk menggerakkan fasilitas manufaktur dan daur ulang, maka emisi karbon dapat ditekan secara signifikan. Studi menunjukkan bahwa jejak lingkungan proses daur ulang dapat turun lebih dari 50% bila dilakukan di wilayah dengan pasokan energi rendah emisi [16].

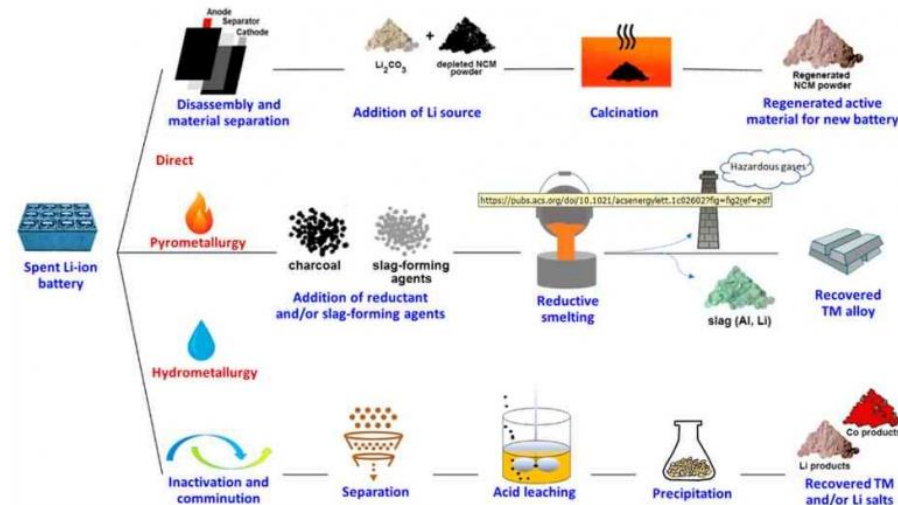
Upaya keberlanjutan juga perlu mencakup strategi perpanjangan usia pakai baterai. Teknologi manajemen baterai (battery management systems/BMS) yang canggih memungkinkan pemantauan kesehatan baterai secara real-time dan pencegahan kerusakan dini. Bersamaan dengan itu, program repurposing—yakni penggunaan kembali baterai bekas dari kendaraan listrik untuk aplikasi stasioner seperti penyimpanan energi rumah atau industri—juga dapat memperpanjang masa guna baterai dan menunda beban daur ulang.

Namun keberlanjutan tidak bisa berjalan satu arah. Kebijakan pemerintah yang mendorong ekonomi sirkular, seperti sistem insentif daur ulang, larangan pembuangan sembarangan, serta dukungan riset daur ulang rendah emisi, menjadi pengungkit penting. Di sisi lain, edukasi publik mengenai pengembalian baterai bekas dan konsumsi yang bijak memainkan peran tidak kalah vital dalam membangun sistem yang inklusif dan tahan lama.

Transisi menuju baterai berkelanjutan bukan sekadar transformasi teknologi, tetapi juga pergeseran nilai: dari penggunaan satu arah menuju tanggung jawab bersama. Dengan strategi yang menyentuh seluruh siklus hidup—dari desain, produksi, hingga akhir masa pakai—maka baterai masa depan dapat menjadi bagian dari solusi, bukan bagian dari masalah.

F. DAUR ULANG BATERAI

Baterai adalah pilar utama transisi energi modern—menghidupkan kendaraan listrik, menyimpan energi surya, dan mendorong kehidupan nirkabel. Namun, keberadaannya tak sepenuhnya tanpa bayangan. Di balik kontribusi positif terhadap pengurangan emisi, tersimpan risiko lingkungan dan sosial dari bahan mentah hingga limbah akhir.



Gambar 1. Skema Daur Ulang Baterai Li-ion (Sumber: BLithium-Ion Battery Recycling: Overview of Techniques and Trends. ACS Energy Letters)

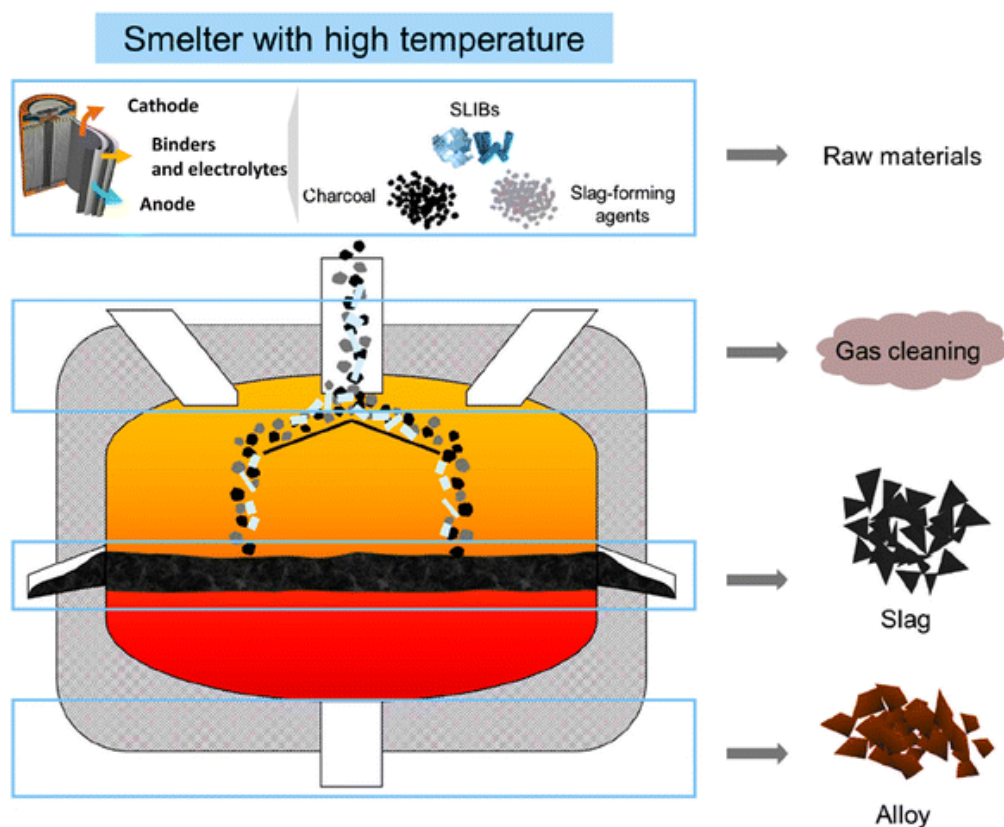
Satu baterai bekas bisa menjadi bencana lingkungan jika dibuang sembarangan, namun bisa juga menjadi sumber daya strategis bila didaur ulang dengan tepat. Pengelolaan limbah baterai yang aman dan efisien bukan sekadar pilihan, melainkan keharusan moral dan ekologis. Oleh karena itu, memahami metode daur ulang menjadi krusial—tidak hanya untuk industri, tetapi juga untuk masyarakat yang ingin berpartisipasi dalam praktik berkelanjutan. Berikut empat pendekatan utama dalam daur ulang baterai saat ini:

1. Pirometalurgi (Pyrometallurgy)

Proses: Menggunakan suhu tinggi ($>1200^{\circ}\text{C}$) untuk melelehkan material dan memisahkan logam-logam berat dari slag [18].

Langkah-langkah:

1. Discharge dan penghancuran awal baterai
2. Roasting untuk menghilangkan elektrolit
3. Peleburan dalam tanur
4. Pemurnian hasil logam (Co, Ni, Cu)



Gambar 2. Typical pyrometallurgical processes of spent LIBs. Reproduced with permission from ref. 62; Copyright 2021, American Chemical Society [23]

Kelebihan:

- Cocok untuk campuran baterai dengan komposisi tak seragam
- Teknologi telah matang dan tersedia secara komersial

Kekurangan:

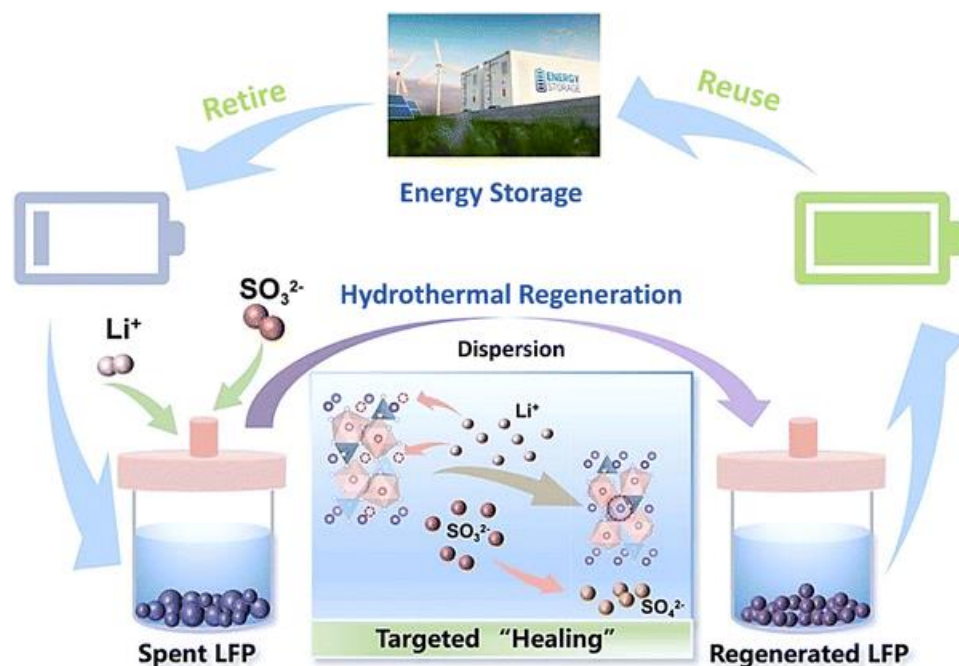
- Konsumsi energi sangat tinggi
- Menghasilkan emisi karbon dan gas beracun
- Unsur seperti litium sering hilang dalam slag

2. Daur Ulang Hidrometalurgi (Hydrometallurgy)

Proses: Melibatkan pelindian kimia menggunakan asam dan oksidator untuk melarutkan logam-logam berharga [19].

Langkah-langkah:

1. Penghancuran menjadi black mass
2. Pelindian menggunakan $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$
3. Pemisahan logam melalui presipitasi atau elektrolisis
4. Pemurnian dan kristalisasi



Gambar 3. Regenerasi hidrotermal dari LIB bekas sebagai daur ulang loop tertutup.
Direproduksi dengan izin dari ref. 123; Hak cipta 2023, Elsevier [23]

Kelebihan:

- Efisiensi tinggi dalam mengekstrak litium, kobalt, nikel, mangan
- Dapat dioperasikan pada skala kecil hingga besar
- Limbah padat lebih sedikit dibanding pirometalurgi

Kekurangan:

- Menghasilkan limbah cair yang harus ditangani hati-hati
- Biaya pemisahan logam dapat tinggi
- Sensitif terhadap variasi komposisi baterai

3. Daur Ulang Mekanis (Mechanical Recycling)

Proses: Pemisahan komponen baterai secara fisik tanpa reaksi kimia atau panas ekstrem [20].

Langkah-langkah:

1. Sortasi dan discharge
2. Shredding dalam lingkungan inert (CO_2/N_2)
3. Pemisahan berdasarkan magnetik, densitas, dan ukuran
4. Ekstraksi black mass untuk pengolahan lanjutan



Gambar 4. Skema daur ulang mekanik [24]

Kelebihan:

- Proses ramah lingkungan, tanpa reagen kimia
- Menjadi tahap awal penting sebelum metode lain
- Biaya energi lebih rendah

Kekurangan:

- Tidak menghasilkan logam murni secara langsung
- Efektivitas terbatas jika tanpa integrasi metode lanjut
- Potensi risiko kebakaran saat shredding

4. Daur Ulang Langsung (Direct Recycling)

Proses: Memulihkan material aktif (terutama katoda) tanpa menghancurkan struktur kimianya [21].

Langkah-langkah:

1. Pembongkaran sel baterai
2. Pembersihan material aktif dari pengotor
3. Re-lithiation untuk memulihkan struktur kristal
4. Re-coating dan penyusunan kembali

Kelebihan:

- Hemat energi dan biaya karena tidak membutuhkan pemurnian total
- Mempertahankan performa elektroda
- Ideal untuk sistem daur ulang berbasis produsen (closed loop)

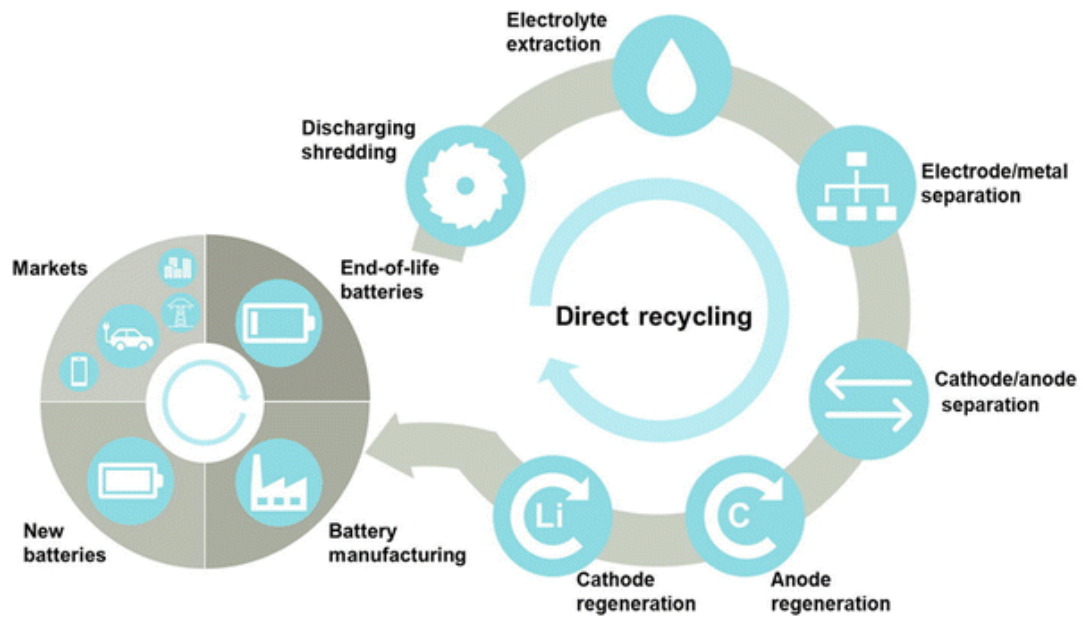
Kekurangan:

- Membutuhkan sortasi baterai yang sangat presisi
- Sulit diterapkan pada limbah dari berbagai sumber
- Teknologi masih dalam tahap pengembangan industri

Mengapa Ini Penting

Tanpa pengelolaan yang benar, limbah baterai dapat mencemari tanah, air, bahkan memicu ledakan. Namun dengan sistem daur ulang yang tepat, kita bisa:

- Mengurangi ketergantungan pada penambangan baru
- Menghemat energi dan emisi dalam proses produksi
- Melindungi ekosistem dari kontaminasi logam berat



Gambar4. Langkah-langkah utama yang terlibat dalam daur ulang LIB bekas menggunakan proses daur ulang langsung. Direproduksi (diadaptasi dan dimodifikasi) dengan izin dari ref. 48; Hak cipta 2020, Elsevier.[23]

Daftar Pustaka

- [1] S. Poncet, A. Marmier, M. Richaud, and F. Tedde, "Environmental impacts of batteries for low-carbon technologies: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, 103059, 2021.
- [2] F. Liu, M. Yang, and D. Zhang, "Lithium extraction and water stress in the global lithium triangle," *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 3176–3185, 2022.
- [3] G. Harper et al., "The future of battery production: Environmental challenges and policy responses," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2212–2225, 2022.
- [4] C. F. Malmgren and H. Ljunggren Söderman, "Circular economy strategies for lithium-ion batteries: A review of current policies and industry practices," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 180, 106221, 2023.
- [5] S. W. Gruson et al., "Occupational exposure to cobalt in the battery industry: A systematic review," *Journal of Occupational Health*, vol. 63, no. 1, 2021.
- [6] H. A. Mayer et al., "Health and environmental risks of lithium production," *Environment International*, vol. 158, 106982, 2022.
- [7] L. Wang et al., "Toxicity assessment of electrolyte chemicals in lithium-ion batteries: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 429, 128346, 2022.
- [8] Y. Kim, J. Lee, and M. Choi, "Toxicological profile of N-methyl-2-pyrrolidone used in battery manufacturing," *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 90, 103819, 2022.
- [9] G. Harper et al., "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 75–86, 2019.

- [10] H. E. Melin, "State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 6, pp. 1170–1179, 2020.
- [11] G. Harper *et al.*, "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 75–86, 2019.
- [12] H. E. Melin, "State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 6, pp. 1170–1179, 2020.
- [13] G. V. Hoof, B. Robertz, and B. Verrecht, "Towards sustainable battery recycling: A carbon footprint comparison between pyrometallurgical and hydrometallurgical battery recycling flowsheets," *Metals*, vol. 13, no. 12, p. 1915, 2023.
- [14] G. Gonzales-Calienes, M. Kannangara, and F. Bensebaa, "Economic and environmental viability of lithium-ion battery recycling—Case study in two Canadian regions with different energy mixes," *Batteries*, vol. 9, no. 7, p. 375, 2023.
- [15] E. Fan *et al.*, "Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: Challenges and future prospects," *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 14, pp. 7020–7063, 2020.
- [16] G. Gonzales-Calienes, M. Kannangara, and F. Bensebaa, "Economic and environmental viability of lithium-ion battery recycling—Case study in two Canadian regions with different energy mixes," *Batteries*, vol. 9, no. 7, p. 375, 2023.
- [17] G. V. Hoof, B. Robertz, and B. Verrecht, "Towards sustainable battery recycling: A carbon footprint comparison between pyrometallurgical and hydrometallurgical battery recycling flowsheets," *Metals*, vol. 13, no. 12, p. 1915, 2023.
- [18] G. V. Hoof, B. Robertz, and B. Verrecht, "Towards sustainable battery recycling: A carbon footprint comparison between pyrometallurgical and hydrometallurgical battery recycling flowsheets," *Metals*, vol. 13, no. 12, p. 1915, 2023.
- [19] Zeng, X., Li, J., and Singh, N., "Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 44, no. 10, pp. 1129–1165, 2014.
- [20] Gaines, L., "Battery recycling: Research, technology, and policy," *Energy Policy*, vol. 120, pp. 595–601, 2018.
- [21] Harper, G. *et al.*, "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles," *Nature*, vol. 575, pp. 75–86, 2019.
- [22] M. F. Marsuki, "Daur Ulang Baterai Kendaraan Listrik dan Tantangannya di Indonesia," *Kompasiana*, 24 Desember 2024. [Online]. Tersedia: <https://www.kompasiana.com/mfmdtekno5165/676a22e9ed64151c2912d092/daur-ulang-baterai-kendaraan-listrik-dan-tantangannya-di-indonesia>.
- [23] B. K. Biswal, B. Zhang, P. T. M. Tran, J. Zhang, dan R. Balasubramanian, "Recycling of spent lithium-ion batteries for a sustainable future: recent advancements," *Chemical Society Reviews*, vol. 53, no. 11, pp. 5552–5592, 2024. [Online]. Tersedia: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/cs/d3cs00898c>.
- [24] BatX Energies, "How Mechanical Processes Recycle Lithium-Ion Batteries," BatX Energies, 21 April 2024. [Online]. Tersedia: <https://batxenergies.com/how-mechanical-processes-recycle-lithium-ion-batteries/>

Latihan 5

A. Soal Pilihan Ganda

1. Apa perbedaan utama antara baterai primer dan sekunder?

- A. Jenis elektrolit yang digunakan
- B. Jenis logam pada elektroda
- C. Kemampuan untuk diisi ulang
- D. Tegangan nominal

✓ jawaban benar: ☐

2. Reaksi kimia pada baterai alkaline melibatkan oksidasi pada?

- A. Katoda
- B. Elektrolit
- C. Anoda
- D. Separator

✓ jawaban benar: ☐

3. Baterai yang menggunakan oksigen dari udara sebagai katoda?

- A. Lithium-ion
- B. Zinc-Carbon
- C. Zinc-Air
- D. NiMH

✓ jawaban benar: ☐

4. Salah satu kelebihan baterai sekunder adalah?

- A. Umur simpan panjang
- B. Tidak dapat diisi ulang
- C. Ramah lingkungan
- D. Harga awal murah

✓ jawaban benar: ☐

5. Reaksi reduksi pada baterai silver-oxide terjadi di?

- A. Anoda
- B. Katoda
- C. Elektrolit
- D. Separator

✓ jawaban benar: ☐

6. Baterai NiCd memiliki kelemahan utama yaitu?

- A. Tidak tahan suhu tinggi
- B. Mengandung logam berat beracun
- C. Tidak dapat diisi ulang
- D. Tidak stabil secara kimia

✓ jawaban benar: ☐

7. Baterai lithium-ion menggunakan material katoda berupa?

- A. Zn
- B. MnO_2
- C. LiFePO_4
- D. Ag_2O

✓ jawaban benar: ☐

8. Baterai solid-state lebih aman karena?

- A. Menggunakan elektrolit cair
- B. Tidak memiliki anoda
- C. Menggunakan elektrolit padat
- D. Tidak menghasilkan panas

✓ jawaban benar: ☐

9. Baterai primer yang umum digunakan dalam jam tangan adalah?

- A. Zinc-Carbon
- B. Alkaline
- C. Silver-Oxide
- D. NiMH

✓ jawaban benar: ☐

10. Dalam baterai Lead-Acid, reaksi saat discharge di katoda adalah?

- A. $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$
- B. $\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- C. $\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$
- D. $\text{PbO}_2 \rightarrow \text{Pb} + \text{O}_2$

✓ jawaban benar: ☐

B. Soal Essay

1. Jelaskan prinsip kerja umum dari baterai berdasarkan reaksi redoks?



2. Bandingkan kelebihan dan kekurangan baterai primer dan sekunder?



mahal, umur pakai terbatas.

3. Jelaskan reaksi kimia yang terjadi pada baterai NiMH saat discharge dan charging?



4. Mengapa baterai lithium-ion sangat populer dalam perangkat elektronik modern?



5. Jelaskan bagaimana sistem Battery Management System (BMS) berperan dalam baterai sekunder?

