



Analisis *Life Cycle Assessment* Pada Proses *Bio-leaching* dan *Solvent Extraction* untuk *Recovering* Kobalt dari Limbah Baterai Litium

Muhammad Revanza Naufal Novianto^{a,1}, Alif Zaky Supriadi^{a,2}, Fransiska Maura Meilani Pasaribu^{a,3}, Muhamad Eko Prasetyo^{a,4}, Muhammad Rizky Nurzaman^{a,5}, Adhitya Trenggono^{a,6}, Bening Nurul Hidayah Kambuna^{a,7}

^aJurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jenderal Sudirman KM. 03, Kotabumi Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

¹E-mail: 3334230057@untirta.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 00 Desember 00
Direvisi pada 00 Januari 00
Disetujui pada 00 Februari 00
Tersedia daring pada 00 Maret 00

Kata kunci:

Bio-leaching, LCA, Kobalt, *Solvent extraction*.

Keywords:

Bio-leaching, LCA, Cobalt, Solvent extraction.

ABSTRAK

Permintaan baterai ion litium yang terus meningkat memicu tantangan limbah di akhir siklus pakai, terutama kandungan kobalt (Co) yang bernilai tinggi dan perlu didaur ulang secara efisien dan ramah lingkungan. Studi ini membandingkan dua metode utama yaitu *bio-leaching* (pelindian biologis oleh mikroorganisme) dan *solvent extraction* (ekstraksi pelarut secara hidrometalurgi) terhadap limbah baterai litium bekas seperti NMC dan LCO. Kajian berbasis literatur 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa *bio-leaching* mampu mengekstraksi sekitar 80–90 persen kobalt dengan dampak lingkungan lebih rendah karena menggunakan asam organik dari mikroba. Sementara itu, metode hidrometalurgi dengan pelindian asam diikuti *solvent extraction* dapat memulihkan lebih dari 90 persen kobalt secara cepat dan menghasilkan logam berkualitas tinggi, meskipun membutuhkan reagen kimia kuat dan pengolahan limbah cair. Berdasarkan *Life Cycle Assessment* (LCA), keduanya lebih ramah lingkungan dibanding produksi primer dari aktivitas tambang. *Bio-leaching* menghasilkan sekitar 16–19 kilogram CO₂-eq per kilogram kobalt, jauh lebih rendah dibanding pelindian asam konvensional yang menghasilkan sekitar 43–91 kilogram CO₂-eq. Daur ulang juga menghemat konsumsi energi dan air masing-masing hingga 46 persen dan 40 persen. Temuan ini menegaskan bahwa *recovery* kobalt secara sekunder tidak hanya *feasible* secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan signifikan melebihi produksi primer.

ABSTRACT

The growing demand for lithium-ion batteries has led to end-of-life waste challenges, particularly the high-value cobalt (Co) content that needs to be recycled efficiently and environmentally friendly. This study compares two main methods: *bio-leaching* (biological leaching by microorganisms) and *solvent extraction* (hydrometallurgical solvent extraction) for used lithium battery waste such as NMC and LCO. A literature review of the past 10 years shows that *bio-leaching* can extract approximately 80–90 percent of cobalt with lower environmental impact, as it uses organic acids produced by microorganisms. Meanwhile, the hydrometallurgical method involving acid leaching followed by *solvent extraction* can recover over 90 percent of cobalt quickly and produce high-quality metal, though it requires strong chemical reagents and liquid waste treatment. Based on *Life Cycle Assessment* (LCA), both are more environmentally friendly than primary production from mines. *Bio-leaching* produces approximately 16–19 kilograms of CO₂-eq per kilogram of cobalt, significantly lower than conventional acid leaching, which produces approximately 43–91 kilograms of CO₂-eq. Recycling also saves energy and water consumption by up to 46 percent and 40 percent, respectively. These findings confirm that secondary cobalt recovery is not only technically feasible but also provides significant environmental benefits over primary production.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/furnace>

1. Pendahuluan

Permintaan dunia terhadap kobalt melonjak drastis dalam beberapa tahun terakhir. Bahan ini memainkan peran penting sebagai komponen utama dalam katoda baterai litium-ion (LIB), teknologi penyimpanan energi yang kini mendominasi berbagai perangkat, mulai dari ponsel dan laptop hingga mobil listrik yang populasinya terus bertambah. Namun, ketergantungan tinggi terhadap kobalt memunculkan sejumlah tantangan serius. Sebagian besar pasokan kobalt dunia, sekitar 70% berasal dari Republik Demokratik Kongo [47]. Konsentrasi geografis ini membuat pasokan menjadi rentan, apalagi ditambah dengan masalah sosial dan lingkungan yang kerap mewarnai aktivitas penambangan di wilayah tersebut. Karena itu, banyak negara dan lembaga kini mengklasifikasikan kobalt sebagai mineral yang kritis dan strategis. Di sisi lain, peningkatan penggunaan kendaraan listrik juga memunculkan masalah baru, yaitu *waste material* berupa limbah baterai. Diperkirakan, pada tahun 2030 volume limbah baterai hanya dari mobil listrik bisa mencapai 12,85 juta ton secara global [48]. Melihat hal tersebut, daur ulang baterai terutama untuk proses *recovery* kobalt menjadi sebuah kebutuhan, bukan sekadar pilihan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, karena dapat mengurangi ketergantungan pada penambangan baru, menghemat sumber daya alam, dan menekan dampak negatif terhadap lingkungan. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa daur ulang LIB mampu memangkas jejak lingkungan hingga 58% dibandingkan proses produksi berbasis tambang [49].

Meski begitu, metode daur ulang yang umum digunakan saat ini seperti pirometalurgi (menggunakan suhu tinggi) dan hidrometalurgi (menggunakan larutan kimia) masih memiliki kekurangan, seperti biaya tinggi, konsumsi energi besar, dan penggunaan bahan kimia berbahaya. Sebagai alternatif, muncul metode *bio-leaching* yang dianggap lebih ramah lingkungan. Proses ini memanfaatkan mikroorganisme seperti bakteri atau jamur untuk menghasilkan pelarut alami seperti asam organik, yang kemudian melarutkan logam berharga dari limbah baterai [50]. Beberapa studi bahkan menunjukkan bahwa *bio-leaching* bisa mencapai efisiensi pemulihan kobalt hingga lebih dari 80%, bahkan 96% dalam kondisi ideal [48]. Namun, setiap metode tentu punya kelebihan dan kekurangan. Karena itu, perlu ada evaluasi menyeluruh terhadap dampak lingkungannya. Di sinilah peran *Life Cycle Assessment (LCA)*, sebuah metode standar global untuk mengukur dampak lingkungan dari awal hingga akhir siklus hidup suatu produk atau proses [51]. Dalam konteks daur ulang kobalt, perbandingan LCA antara *bio-leaching* dan *solvent extraction* menjadi sangat penting agar kita bisa memilih solusi paling berkelanjutan [52]. Tekanan dari regulasi, tuntutan pasar akan produk *low carbon*, serta meningkatnya perhatian terhadap isu *environmental* (lingkungan), *social* (sosial), dan *governance* (tata kelola) atau ESG di sektor mineral kritis seperti kobalt menjadi landasan penting dalam menentukan arah teknologi daur ulang masa depan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi literatur yang bertujuan membandingkan dampak lingkungan dari dua metode *recovery* kobalt, yaitu *bio-leaching* dan *solvent extraction*, pada limbah *lithium-ion battery (LIB)* dengan menggunakan data *Life Cycle Assessment (LCA)* dari studi-studi terdahulu. Proses penelitian meliputi pencarian literatur secara sistematis pada berbagai database internasional menggunakan kata kunci terkait, seleksi studi berdasarkan kriteria tertentu seperti publikasi *peer-reviewed* yang memuat data kuantitatif LCA, serta ekstraksi informasi penting meliputi detail publikasi, deskripsi proses, metodologi LCA, data hasil LCA (terutama potensi pemanasan global dan konsumsi energi), efisiensi proses, dan faktor penyumbang utama dampak lingkungan. Data kemudian dianalisis dengan mengklasifikasikan studi berdasarkan jenis teknologi, membandingkan hasil secara kuantitatif sambil mempertimbangkan perbedaan metodologi, serta mengidentifikasi tren, keunggulan, kelemahan, dan keterbatasan perbandingan. Hasilnya diinterpretasikan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak lingkungan masing-masing teknologi, menyortir pola konsisten maupun perbedaan, serta menawarkan rekomendasi pengembangan teknologi yang lebih ramah lingkungan dan arah riset di masa depan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis LCA Pada Bio-leaching untuk Proses Recovery Kobalt

Bio-leaching adalah proses bioteknologi yang menggunakan mikroorganisme untuk melarutkan logam dari material padat seperti limbah baterai litium. Proses ini melibatkan langkah-langkah pra-pemrosesan seperti pemaknaan, pembongkaran, dan penghancuran untuk menghasilkan bubuk katoda (*black mass*), yang kemudian dilebur menggunakan asam organik [48]. Proses *bio-leaching* biasanya dilakukan di dalam bioreaktor berisi cairan, di mana mikroorganisme mendapatkan kondisi optimal untuk bekerja. Dalam beberapa kasus, *ferrous sulfate* juga ditambahkan sebagai agen pereduksi tambahan untuk membantu mempercepat proses pelarutan logam [53]. Untuk meningkatkan efisiensi proses, biasanya ditambahkan sedikit agen pengoksidasi seperti ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} , serta dilakukan pengaturan pH dan temperatur agar kondisi lingkungan tetap optimal bagi aktivitas mikroba. Keunggulan utama dari metode ini adalah sifatnya yang jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan teknik pelindian konvensional. Asam organik yang dihasilkan, seperti asam glukonat, bersifat non-korosif, mudah terurai (*biodegradable*), dan proses produksinya dianggap sebagai pendekatan *green chemistry* [54]. Salah satu kelebihan penting lain dari *bio-leaching* adalah kondisi operasinya yang relatif ringan. Karena tidak memerlukan panas ekstrem, konsumsi energi termal dapat ditekan secara signifikan, sehingga menjadikan *bio-leaching* sebagai alternatif yang lebih hemat energi [55]. Tidak seperti proses pelindian dengan asam kuat yang sering menghasilkan gas beracun seperti klorin (Cl_2), sulfur oksida (SO_x), atau nitrogen oksida (NO_x), *bio-leaching* menggunakan asam organik yang dihasilkan mikroba secara alami [56].

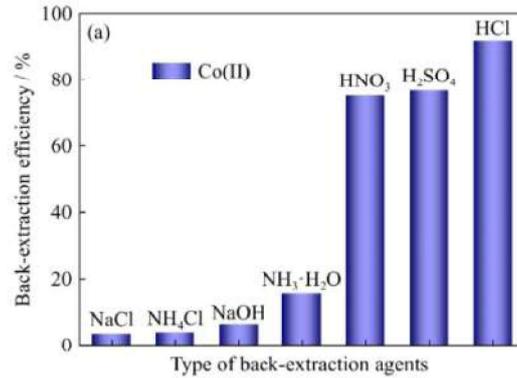
Analisis *Life Cycle Assessment (LCA)* pada skenario *bio-leaching* menunjukkan bahwa metode ini secara signifikan mengurangi jejak lingkungan dibandingkan proses kimia konvensional [57]. Daur ulang logam seperti kobalt melalui pendekatan bio-hidrometalurgi juga berkontribusi dalam mengurangi ketergantungan pada penambangan primer yang merusak lingkungan. Sebuah studi menunjukkan bahwa dengan mendaur ulang kobalt dan nikel, kita dapat menghemat sekitar 51% sumber daya alam yang seharusnya terkuras jika logam-logam tersebut diekstraksi langsung dari bijih tambang baru [58]. Dalam sebuah studi oleh Roy dkk. (2021), proses *bio-leaching* yang menggunakan jamur *Aspergillus niger* menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan. Dengan pengaturan kepadatan padatan tertentu, mereka berhasil mengekstraksi sekitar 91% kobalt (Co), 90% nikel (Ni), dan 84% litium (Li) dari *black mass* baterai litium-ion bekas [59]. Bahkan, hasil ekstraksi logam dari *black mass* dapat ditingkatkan lebih jauh melalui beberapa tahap optimasi proses. Salah satu contohnya adalah dengan penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai agen pengoksidasi tambahan. Strategi ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi pelindian, dengan tingkat ekstraksi kobalt yang dapat mendekati 98% [60]. Perlu dicatat bahwa efisiensi proses *bio-leaching* sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional. Salah satunya adalah kepadatan *pulp*, yaitu rasio jumlah padatan terhadap volume larutan. Pada kepadatan *pulp* yang lebih

tinggi, artinya jumlah padatan dalam reaktor meningkat, sehingga efisiensi pelindian logam cenderung menurun. Misalnya, dalam salah satu studi, peningkatan kepadatan *pulp* dari 1% menjadi 4% menyebabkan penurunan signifikan dalam pemulihan kobalt, dari 52% menjadi hanya 10%. Hal ini mencerminkan adanya *trade-off* antara *throughput* (volume material yang diproses) dan efisiensi ekstraksi logam. Tantangan ini tercermin dalam temuan-temuan analisis LCA, di mana titik kritis sering kali berhubungan dengan upaya menyeimbangkan konsentrasi substrat, kebutuhan aerasi, serta waktu reaksi. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan hasil pelindian tanpa memboroskan energi atau bahan baku. Potensi komersial *bio-leaching* juga tetap sangat menjanjikan. Penelitian terbaru oleh Alipannah dkk. (2023) yang menggabungkan *Techno-Economic Analysis* (TEA) dengan LCA menunjukkan bahwa fasilitas *bio-leaching* berskala industri dapat memproses hingga 10.000 ton *black mass* per tahun. Dengan tingkat pemulihan logam bernilai tinggi (Co, Ni >95%) dan margin keuntungan sekitar 21% [57].

3.2. Analisis LCA Pada Solvent Extraction untuk Proses Recovery Kobalt

Solvent extraction (SX) merupakan salah satu tahap pemurnian paling umum dan penting dalam proses hidrometalurgi untuk mendaur ulang baterai litium-ion (LIB). Proses ini dimulai dengan tahap pelindian (*leaching*), di mana *black mass*, yaitu campuran material elektroda dari baterai bekas, dilarutkan menggunakan pelarut, umumnya asam anorganik seperti asam sulfat (H_2SO_4) atau asam klorida (HCl). Tahap ini menghasilkan larutan kaya logam yang dikenal sebagai *pregnant leach solution* (PLS), yang mengandung berbagai logam berharga seperti kobalt, nikel, mangan, litium, tembaga, dan besi. Agar kobalt dapat dipisahkan dari logam-logam lainnya, larutan PLS kemudian diproses lebih lanjut menggunakan teknik *solvent extraction*. Dalam tahap ini, ekstraktan organik khusus digunakan untuk menarik ion kobalt secara selektif dari fase cair (PLS) ke dalam fase organik, sementara logam lain tetap tertinggal di fase air. Setelah kobalt berhasil dipindahkan, ion tersebut kemudian di-*stripping*, atau dipindahkan kembali ke dalam larutan air baru yang lebih murni. Fase organik yang digunakan akan diregenerasi agar bisa digunakan kembali dalam siklus berikutnya. Tahap akhir dari proses ini adalah pemulihan kembali kobalt dari larutan hasil *stripping*. Ini biasanya dilakukan dengan teknik *electrowinning* untuk menghasilkan logam kobalt murni, atau melalui proses *precipitation* untuk mendapatkan senyawa seperti kobalt sulfat atau kobalt karbonat. Skema proses hidrometalurgi dengan SX ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap awal dalam proses pemulihan kobalt dari baterai litium-ion umumnya dimulai dengan pelindian kimia menggunakan pelarut berupa asam anorganik, seperti asam sulfat (H_2SO_4) atau asam klorida (HCl). Untuk meningkatkan efektivitas pelindian, sering kali ditambahkan agen pereduksi seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) yang membantu melarutkan logam dari material katoda ke dalam larutan [62]. Setelah proses ini, kobalt bersama logam-logam lain seperti nikel, mangan, dan litium akan berada dalam bentuk ion di dalam larutan air, membentuk larutan kaya logam. Langkah berikutnya adalah *solvent extraction*, yang bertujuan memisahkan kobalt secara selektif dari logam-logam lain. Proses ini bekerja berdasarkan prinsip kontak antara dua fase, yaitu fase air (*aqueous phase*) yang mengandung ion logam, dan fase organik yang mengandung senyawa ekstraktan spesifik. Ekstraktan ini dirancang untuk secara selektif mengikat ion kobalt dan memindahkannya dari fase air ke fase organik. Pada pH tertentu, ion-ion kobalt (Co^{2+}) akan berikatan dengan molekul ekstraktan dan membentuk kompleks yang larut dalam fase organik. Sementara itu, logam-logam lain seperti nikel (Ni), mangan (Mn), dan litium (Li) tetap berada di fase air, atau akan diekstraksi di tahap terpisah menggunakan ekstraktan yang berbeda. Proses ini memanfaatkan perbedaan afinitas logam terhadap ekstraktan pada kondisi pH tertentu, sehingga memungkinkan pemisahan yang selektif. Teknik ini sering dilakukan secara bertahap, di mana masing-masing logam dipisahkan satu per satu. Misalnya, pada tahap pertama, mangan diekstraksi menggunakan D2EHPA pada pH sekitar 2–3. Kemudian, pada tahap berikutnya, kobalt dipisahkan menggunakan Cyanex 272 pada pH mendekati 5. Dengan mengatur urutan, pH, dan jenis ekstraktan yang digunakan, proses ini memungkinkan pemurnian logam secara berurutan dan efisien dari larutan hasil pelindian. Setelah kobalt berhasil dipisahkan ke dalam fase organik melalui proses ekstraksi, langkah selanjutnya adalah *stripping*, yaitu memindahkan kembali ion kobalt dari fase organik ke dalam larutan air yang bersih. Proses ini biasanya dilakukan dengan menambahkan larutan asam, seperti asam sulfat (H_2SO_4), yang melepaskan kobalt dari kompleks ekstraktan dan membentuk larutan kaya kobalt, misalnya dalam bentuk kobalt sulfat. Larutan kobalt hasil *stripping* ini kemudian diolah lebih lanjut untuk menghasilkan produk akhir yang bernilai komersial. Dua pendekatan yang umum digunakan adalah proses *precipitation*, yang menghasilkan senyawa seperti kobalt sulfat heptahidrat ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$), atau metode *electrowinning*, yang dapat memproduksi logam kobalt murni atau senyawa lain seperti kobalt oksida, tergantung pada kebutuhan akhir aplikasi [63]. *Solvent extraction* (SX) banyak digunakan dalam proses pemurnian karena dapat dirancang untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi dan mendukung jalur daur ulang tertutup, di mana hasil akhirnya, seperti kobalt sulfat, dapat langsung dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku katoda untuk baterai baru.

Berbeda dengan *bio-leaching* yang mengandalkan aktivitas biologis, metode *solvent extraction* bergantung pada penggunaan reagen kimia yang lebih kuat dan reaktif. Pada tahap pelindian awal, biasanya digunakan asam sulfat atau asam klorida dalam konsentrasi tinggi untuk melarutkan logam dari material katoda. Terlihat pada gambar 1 yang menunjukkan bahwa efisiensi *recovery* kobalt tertinggi diperoleh ketika asam klorida dan asam sulfat digunakan sebagai agen peraksi. Agar proses pelarutan kobalt lebih efektif, sering ditambahkan agen pereduksi seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) atau natrium sulfit (Na_2SO_3), yang berfungsi untuk mereduksi kobalt dari bentuk Co(III) yang kurang larut menjadi Co(II) yang lebih mudah larut dalam larutan asam. Pendekatan ini memungkinkan proses pelindian berlangsung lebih cepat dan efisien, namun juga memerlukan pengelolaan bahan kimia yang cermat karena sifatnya yang lebih agresif dibanding metode biologis [62]. Proses ini menghasilkan larutan pelindian dengan konsentrasi asam sisa yang cukup tinggi, yang harus dikelola dengan baik pada tahap berikutnya. Dalam tahap ekstraksi, digunakan pelarut organik seperti kerosen yang dicampur dengan ekstraktan dalam konsentrasi sekitar 5–20% volume. Ekstraktan seperti Cyanex 272 merupakan asam organik yang bereaksi secara selektif dengan ion logam seperti kobalt, sementara pelarut seperti kerosen berfungsi sebagai *diluent* yang bersifat inert namun mudah terbakar. Karena melibatkan penggunaan pelarut organik dalam jumlah besar, proses ini memerlukan penanganan yang hati-hati, baik dari segi keselamatan karena sifat mudah terbakar, maupun dari sisi kesehatan, karena uap pelarut dapat bersifat toksik. Meskipun sebagian besar pelarut dapat didaur ulang melalui sistem sirkulasi tertutup, kehilangan pelarut (*solvent loss*) tetap bisa terjadi. Oleh karena itu, potensi pencemaran lingkungan akibat uap atau tumpahan pelarut harus dikendalikan dengan baik. Selain itu, setelah proses ekstraksi selesai, fase air sisa (*raffinate*) maupun larutan hasil *stripping* sering kali masih mengandung sisa asam atau garam, serta logam lain seperti litium. Sisa-sisa ini perlu diolah lebih lanjut, baik untuk pemulihan logam tambahan seperti litium, maupun untuk dinetralkan sebelum dibuang secara aman. Secara umum, analisis daur hidup (*Life Cycle Assessment* atau LCA) menunjukkan bahwa jalur hidrometalurgi yang menggabungkan pelindian kimia dan *solvent extraction* memiliki profil dampak lingkungan yang lebih baik dibandingkan metode pirometalurgi tradisional. Hal ini disebabkan oleh konsumsi energi yang lebih rendah dan emisi gas rumah kaca yang lebih terkontrol. Namun demikian, dibandingkan dengan opsi *direct recycling* (daur ulang langsung tanpa pelarutan) atau *bioleaching*, rute hidrometalurgi masih menunjukkan dampak lingkungan yang lebih tinggi dalam beberapa kategori, seperti penggunaan bahan kimia agresif, toksisitas terhadap manusia, serta potensi pencemaran air dan tanah [65]. Kontributor utama terhadap dampak lingkungan

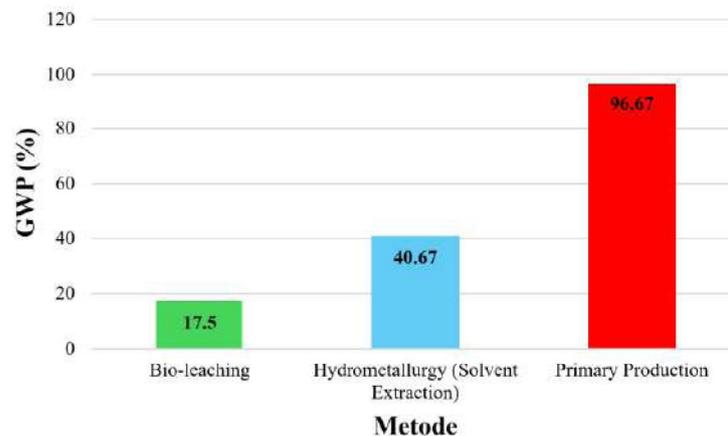


Gambar 1. - Perbandingan tujuh agen ekstraksi balik pada efisiensi ekstraksi balik Co(II) [64].

dari proses *solvent extraction* adalah konsumsi bahan kimia dan penggunaan energi listrik, terutama pada tahap-tahap awal proses. Meskipun tahap SX itu sendiri biasanya berlangsung pada suhu ruang, bagian *upstream*-nya, yaitu pelindian, sering membutuhkan larutan asam kuat seperti asam sulfat (H_2SO_4) atau asam klorida (HCl), serta pemanasan larutan hingga suhu sekitar 60–90 °C untuk mempercepat pelarutan logam. Selain itu, proses produksi bahan kimia seperti asam dan ekstraktan menyumbang *embedded energy* yang cukup besar, yaitu energi dan emisi yang terkandung dalam proses pembuatan dan transportasi bahan tersebut. Akumulasi konsumsi energi tidak langsung dan bahan kimia ini menjadi salah satu penyumbang utama dalam jejak lingkungan keseluruhan dari proses hidrometalurgi berbasis SX [61]. LCA oleh Liu dkk. (2023) mengidentifikasi bahwa penggunaan ekstraktan menjadi salah satu *hotspot* utama dalam proses SX. Dalam studi tersebut, dua skenario daur ulang baterai litium-ion (LIB) yang sama-sama menggunakan *solvent extraction* dibandingkan, dan hasilnya menunjukkan bahwa opsi yang menggunakan jumlah ekstraktan lebih sedikit memiliki dampak lingkungan sekitar 20% lebih rendah. Perbedaan ini terlihat jelas dalam kategori seperti *human toxicity* dan *global warming potential* (GWP), mempertegas bahwa efisiensi dalam penggunaan bahan kimia bukan hanya berdampak pada biaya, tetapi juga memainkan peran besar dalam keberlanjutan proses daur ulang [66]. Temuan-temuan ini sejalan dengan prinsip *green chemistry*, yang menekankan pentingnya mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya sebagai cara langsung untuk menurunkan jejak lingkungan suatu proses. Dalam konteks daur ulang baterai, pendekatan hidrometalurgi yang menggabungkan *solvent extraction* terbukti mampu secara signifikan mengurangi emisi dibandingkan produksi logam primer dari bijih. Salah satunya adalah analisis komprehensif oleh Liu dkk. (2023), yang membandingkan berbagai skema proses (*flowsheet*) hidrometalurgi untuk mendaur ulang berbagai jenis katoda termasuk LCO, NMC, dan LFP. Hasilnya menunjukkan bahwa proses hidrometalurgi terbaik dalam setiap kategori katoda mampu menghasilkan dampak lingkungan yang lebih dari 50% lebih rendah dibandingkan rata-rata dari semua proses daur ulang yang dievaluasi. Ini menunjukkan bahwa dengan desain proses yang efisien dan pemilihan bahan yang tepat, hidrometalurgi tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga kompetitif dari sisi keberlanjutan [66]. Artinya, dengan desain proses yang tepat, daur ulang hidrometalurgi dapat menghemat >50% emisi dan energi dibanding pendekatan lain.

3.3. Analisis Perbandingan Dampak Lingkungan dan Tantangan: Bio-leaching vs. Solvent Extraction (Hidrometalurgi)

Melakukan perbandingan langsung dampak lingkungan antara proses *bio-leaching* dan *solvent extraction* (sebagai bagian dari hidrometalurgi) untuk perolehan kembali kobalt memerlukan kehati-hatian karena variasi dalam metodologi LCA, batasan sistem, unit fungsional, dan tingkat kematangan teknologi yang dilaporkan dalam literatur. Berdasarkan data yang tersedia, studi oleh Alipanah dkk. (2023) melaporkan GWP untuk proses *bio-leaching* yang mereka kembangkan sebesar 16-19 kg CO₂-eq per kg kobalt terecovery [57]. Untuk proses hidrometalurgi yang melibatkan *solvent extraction*, data yang secara langsung sebanding dengan FU "per kg kobalt" lebih sulit ditemukan. Studi oleh Ciez dkk. (2024) menyediakan data GWP sebesar 2,1 kg CO₂-eq per kg NCA-eq untuk tahap pemurnian *gate-to-gate* (yang mencakup hidrometalurgi/SX) untuk menghasilkan produk garam campuran. Jika kita mencoba mengestimasi GWP per kg kobalt dari angka ini, dengan asumsi kandungan kobalt dalam katoda NCA (misalnya, LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O₂, di mana



Gambar 2. - Perbandingan nilai GWP antar metode pemulihan kobalt [52], [57], [68].

di mana kobalt menyusun sekitar 15% dari berat logam transisi, atau sekitar 9-10% dari berat total katoda jika memperhitungkan litium dan oksigen), maka GWP per kg kobalt akan secara signifikan lebih tinggi dari 2,1 kg CO₂-eq [67]. Jika kita menggunakan perbandingan dalam studi Alipanah dkk. (2023) yang

membandingkan *bio-leaching* dengan pelindian menggunakan HCl (yang menghasilkan GWP 43-91 kg CO₂-eq/kg Co) sebagai proksi kasar untuk aspek pelindian kimia dalam hidrometalurgi sebelum SX, maka *bio-leaching* tampak lebih unggul. Gambar 2 menyajikan grafik perbandingan antara nilai GWP terhadap setiap metode. Dari Gambar 2, terlihat masing-masing metode memiliki dampak lingkungan yang berbeda. *Bio-leaching* menunjukkan nilai GWP yang paling rendah di antara semua skenario. Sementara itu, metode hidrometalurgi konvensional seperti pelindian dengan asam kuat (misalnya HCl atau H₂SO₄) yang diikuti dengan ekstraksi pelarut, cenderung menghasilkan jejak karbon yang jauh lebih tinggi. Bahkan, dalam kondisi terburuk ketika penggunaan bahan kimia dan konsumsi energi tidak dioptimalkan, metode ini bisa menghasilkan emisi yang lebih besar dibandingkan proses produksi primer dari bijih kobalt. Hasil LCA Alipannah dkk. menyimpulkan *bio-leaching* bukan saja layak secara ekonomi, tapi juga lebih berkelanjutan secara lingkungan dibanding metode hidrometalurgi alternatif. Proses ini mengurangi ketergantungan pada penambangan kobalt primer (yang kerap menimbulkan kerusakan ekologis dan konflik sosial di area tambang) sekaligus menyediakan material penting untuk baterai baru dengan dampak lingkungan lebih rendah. Secara keseluruhan, konsumsi listrik dan penggunaan bahan kimia seperti asam, basa, dan ekstrak organik secara konsisten muncul sebagai kontributor terbesar terhadap dampak lingkungan dalam jalur hidrometalurgi. Kelebihan, kekurangan, dan potensi optimasi masing-masing metode disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komparasi antar metode.

Metode	Kelebihan	Kekurangan	Potensi optimal
<i>Bio-leaching</i>	Potensi GWP yang lebih rendah dalam beberapa kasus, kondisi operasi yang lebih ringan (suhu dan pH moderat), dan potensi penggunaan reagen yang dianggap lebih ramah lingkungan atau dihasilkan secara biologis [48]	Kinetika reaksi yang umumnya lambat, tantangan dalam peningkatan skala ke tingkat industri, dan sensitivitas mikroorganisme terhadap kondisi lingkungan dan toksisitas logam [48]	Pengembangan strain mikroba yang lebih unggul (lebih cepat, lebih toleran), optimasi desain bioreaktor (misalnya, untuk transfer massa dan oksigen yang lebih baik), integrasi dengan tahap pra-perlakuan fisik yang efisien dan minimal, serta pengembangan proses hilir yang efisien dan ramah lingkungan untuk memurnikan logam dari <i>bioleachate</i>
<i>Solvent extraction</i>	Merupakan teknologi yang relatif matang dengan efisiensi perolehan kembali logam yang tinggi (misalnya, hingga 95% untuk Co), mampu menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi yang sesuai untuk aplikasi baterai, dan memiliki laju pemrosesan yang umumnya lebih cepat dibandingkan <i>bio-leaching</i> [49], [68]	Konsumsi energi dan bahan kimia yang tinggi, serta potensi pembentukan limbah berbahaya (misalnya, pelarut organik bekas, endapan pengotor) jika tidak dikelola dengan baik dan jika sirkuit daur ulang reagen tidak efisien [68]	Pengembangan dan penggunaan pelarut hijau atau <i>Deep Eutectic Solvents</i> (DES) yang lebih ramah lingkungan dan mudah didaur ulang, peningkatan efisiensi regenerasi pelarut dan reagen kimia, penggunaan sumber energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan listrik proses, dan integrasi proses yang lebih baik untuk mengurangi jumlah unit operasi dan konsumsi energi. [69 - 70]

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa baik metode *bio-leaching* maupun solvent extraction (SX) memiliki kelebihan dan tantangan masing-masing dalam konteks pemulihan logam dari limbah baterai. *Bio-leaching* menonjol dalam aspek keberlanjutan, karena beroperasi pada kondisi yang lebih ringan (suhu dan pH moderat) dan menggunakan reagen biologis yang ramah lingkungan, sehingga memiliki potensi *Global Warming Potential* (GWP) yang lebih rendah. Namun, metode ini masih menghadapi hambatan besar dalam hal kecepatan reaksi yang lambat dan sensitivitas mikroba terhadap kondisi proses. Di sisi lain, solvent extraction merupakan teknologi yang sudah matang secara industri, dengan efisiensi pemulihan logam tinggi dan kemampuan menghasilkan produk berkualitas tinggi untuk baterai, namun dibarengi dengan konsumsi energi dan bahan kimia yang tinggi serta risiko limbah berbahaya. Potensi optimal dari kedua metode terletak pada arah pengembangan teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan, *bio-leaching* melalui rekayasa mikroba dan bioreaktor, sedangkan SX melalui adopsi pelarut hijau seperti *Deep Eutectic Solvents* (DES), pemanfaatan energi terbarukan, serta integrasi proses dan daur ulang reagen yang lebih efektif.

4. Kesimpulan

1. Analisis LCA menunjukkan *bio-leaching* secara konsisten lebih ramah lingkungan dibanding metode hidrometalurgi konvensional; GWP *bio-leaching* tercatat ~16–19 kg CO₂-eq/kg Co, jauh di bawah metode asam (hingga 91 kg) maupun produksi primer (~28 kg). Skenario hidrometalurgi + *solvent extraction* juga dapat unggul daripada produksi primer apabila dioptimasi, misalnya dengan mengurangi penggunaan ekstrak dan memanfaatkan energi terbarukan.
2. Proses *bio-leaching* dan *solvent extraction* keduanya mampu memulihkan kobalt >90% dari limbah baterai lithium-ion. Hal ini menjadikan daur ulang sebagai sumber sekunder kobalt yang sangat potensial, setara dengan bahan baku primer dalam hal *yield*, sehingga dapat mengurangi tekanan pada penambangan kobalt konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- [47] A. B. Botelho Junior, S. Stopic, B. Friedrich, J. A. S. Tenório, and D. C. R. Espinosa, "Cobalt Recovery from Li-Ion Battery Recycling: A Critical Review," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 12, p. 1999, Dec. 2021, doi: 10.3390/met11121999.
- [48] L. Garcia, J. Morell, C. Lao, M. Solé-Sardans, and A. D. Dorado, "Metal Recovery from Discarded Lithium-Ion Batteries by Bioleaching Coupled with Minimal Mechanical Pre-Treatment," *Minerals*, vol. 15, no. 6, p. 566, May 2025, doi: 10.3390/min15060566.

- [49] F. Forte *et al.*, “First economically and environmentally viable mobile commercial metallurgical plant based on advanced hydrometallurgical and electrochemical technologies able to produce cobalt metal from spent lithium-ion batteries,” *Open Res. Eur.*, vol. 4, p. 32, Feb. 2024, doi: 10.12688/openreseurope.16753.1.
- [50] E. Pakostova, J. Graves, E. Latvyte, G. Maddalena, and L. Horsfall, “A novel closed-loop biotechnology for recovery of cobalt from a lithium-ion battery active cathode material,” *Microbiology*, vol. 170, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.1099/mic.0.001475.
- [51] M. A. Rajaeifar, M. Raugei, B. Steubing, A. Hartwell, P. A. Anderson, and O. Heidrich, “Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 25, no. 6, pp. 1560–1571, Dec. 2021, doi: 10.1111/jiec.13157.
- [52] S. H. Farjana, N. Huda, and M. A. P. Mahmud, “Life cycle assessment of cobalt extraction process,” *J. Sustain. Min.*, vol. 18, no. 3, pp. 150–161, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jsm.2019.03.002.
- [53] B. K. Biswal and R. Balasubramanian, “Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: a review,” *Front. Microbiol.*, vol. 14, May 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1197081.
- [54] R. Golmohammadzadeh, F. Faraji, and F. Rashchi, “Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 136, pp. 418–435, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.04.024.
- [55] O. Kwon and I. Sohn, “Fundamental thermokinetic study of a sustainable lithium-ion battery pyrometallurgical recycling process,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 158, p. 104809, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104809.
- [56] L. Li *et al.*, “Sustainable Recovery of Cathode Materials from Spent Lithium-Ion Batteries Using Lactic Acid Leaching System,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 5224–5233, Jun. 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b00571.
- [57] M. Alipanah, D. Reed, V. Thompson, Y. Fujita, and H. Jin, “Sustainable bioleaching of lithium-ion batteries for critical materials recovery,” *J. Clean. Prod.*, vol. 382, p. 135274, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135274.
- [58] J. Dewulf *et al.*, “Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resource savings,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 4, pp. 229–234, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.08.004.
- [59] J. J. Roy, S. Madhavi, and B. Cao, “Metal extraction from spent lithium-ion batteries (LIBs) at high pulp density by environmentally friendly bioleaching process,” *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p. 124242, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124242.
- [60] M. Xu *et al.*, “A process of leaching recovery for cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries by citric acid and salicylic acid,” *RSC Adv.*, vol. 11, no. 44, pp. 27689–27700, 2021, doi: 10.1039/D1RA04979H.
- [61] C. Institute, “The Cobalt Institute conducted a Life Cycle Assessment of cobalt and cobalt compounds including cobalt sulphate to inform stakeholders about the potential environment impacts of the production of cobalt.,” cobaltinstitute.org. Accessed: Jun. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.cobaltinstitute.org/sustainability/lifecycleassessment/>
- [62] A. Paul, P. G. Lizhen, T. Recheal, and S. Ali, “Sustainable Lithium and Cobalt Recovery from Spent Lithium-ion Batteries: Best Practices for the Future. A review,” *J. Anal. Tech. Res.*, vol. 06, no. 02, 2024, doi: 10.26502/jatr.44.
- [63] Y.-C. Tang, J.-Z. Wang, and Y.-H. Shen, “Separation of Valuable Metals in The Recycling of Lithium Batteries via Solvent Extraction,” *Minerals*, vol. 13, no. 2, p. 285, Feb. 2023, doi: 10.3390/min13020285.
- [64] Y. Yang *et al.*, “Solvent extraction and separation of cobalt from leachate of spent lithium-ion battery cathodes with N263 in nitrite media,” *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 30, no. 5, pp. 897–907, May 2023, doi: 10.1007/s12613-022-2571-8.
- [65] J. A. Llamas-Orozco *et al.*, “Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: A temporal, geographical, and technological perspective,” *PNAS Nexus*, vol. 2, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1093/pnasnexus/pgad361.
- [66] Z. Liu *et al.*, “Life cycle assessment of hydrometallurgical recycling for cathode active materials,” *J. Power Sources*, vol. 580, p. 233345, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233345.
- [67] R. E. Ciez and J. F. Whitacre, “Examining different recycling processes for lithium-ion batteries,” *Nat. Sustain.*, vol. 2, no. 2, pp. 148–156, Feb. 2019, doi: 10.1038/s41893-019-0222-5.
- [68] M. L. Machala *et al.*, “Life cycle comparison of industrial-scale lithium-ion battery recycling and mining supply chains,” *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 1, p. 988, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-56063-x.
- [69] S. Suriyanarayanan, M. P. Babu, R. Murugan, D. Muthuraj, K. Ramanujam, and I. A. Nicholls, “Highly Efficient Recovery and Recycling of Cobalt from Spent Lithium-Ion Batteries Using an N -Methylurea–Acetamide Nonionic Deep Eutectic Solvent,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 7, pp. 6959–6967, Feb. 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c07780.
- [70] C. Lee, D. S. Arby, C. Kim, J. Lim, K. Kwon, and E. Chung, “Hydrometallurgical process of spent lithium-ion battery recycling Part. 1 Chemical leaching of valuable metals from cathode active materials: Review and case study,” *Hydrometallurgy*, vol. 235, p. 106494, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.hydromet.2025.106494.