

STUDI TEKNO-EKONOMI PROSES PIROMETALURGI DAUR ULANG BATERAI *LITHIUM MANGANESE OXIDE (LMO)* DAN *LITHIUM IRON PHOSPHATE (LFP)*

Rininta Triaswinanti*¹, Rahmadhani Triastomo*¹, Angella Natalia Ghea Puspita², Abdul Hapid²

¹Direktorat Kebijakan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran – Deputi Bidang Kebijakan Pembangunan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Gedung B.J. Habibie Jalan M.H. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat 10340, DKI Jakarta – Indonesia

²Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Gedung 820 Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Tangerang Selatan – Banten 15314

(Received: August 28, 2022/ Accepted: March 29, 2023)

Abstrak

Limbah baterai lithium-ion diproyeksikan akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah kendaraan listrik. Teknologi daur ulang baterai menjadi perhatian penting terutama dalam mendukung percepatan program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB). Penelitian ini berfokus pada studi tekno-ekonomi pembangunan pilot plant daur ulang baterai Lithium Manganese Oxide (LMO) dan Lithium Iron Phosphate (LFP) secara pirometalurgi. Kapasitas input daur ulang baterai LFP dan LMO adalah 8.000 ton/tahun. Nilai Internal Rate of Return (IRR), Net Present Value (NPV), Payback Period (PBP), dan Profitability Index (PI) daur ulang baterai LMO berturut-turut adalah 12,57%, Rp 7.583.346.464,-, 5,85 tahun, dan 2,39. Sedangkan untuk daur ulang baterai LFP berturut-turut adalah 11,15%, -Rp 11.235.266.123,-, 6,23 tahun, dan 2,32. Hal ini mengindikasikan daur ulang baterai LMO lebih menjanjikan dibandingkan daur ulang baterai LFP. Dari segi analisis sensitivitas, diketahui bahwa daur ulang baterai LMO dan LFP ini lebih sensitif terhadap perubahan harga produk dibandingkan dengan perubahan harga reagen dan nilai OPEX. Emisi gas CO₂ pada proses daur ulang baterai LMO lebih sedikit daripada baterai LFP, sehingga pencemaran lingkungan yang dihasilkan lebih minim. Untuk meminimalisir emisi gas ini, dapat dilakukan instalasi peralatan wet scrubber dan implementasi sistem Carbon Capture and Storage (CCS)/Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS).

Kata kunci: Baterai Lithium Ion; Tekno-Ekonomi; Daur Ulang Baterai; NPV; IRR; PI; PBP; Analisis Sensitivitas; Pirometalurgi

Abstract

[Techno-Economic Study of Pyrometallurgy Process of Lithium Manganese Oxide (LMO) and Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery Recycling] Lithium-ion battery waste is projected to increase along with electric vehicle growth. Battery recycling technology is an important concern, especially in supporting the acceleration of the Battery-Based Electric Vehicle program. This research focuses on the techno-economic study of the construction of a Lithium Manganese Oxide (LMO) and Lithium Iron Phosphate (LFP) battery recycling pilot plant using the pyrometallurgy method to produce an input capacity of LFP and LMO battery recycling of 8,000 tons/year. The Internal Rate of Return (IRR), Net Present Value (NPV), Payback Period (PBP), and Profitability Index (PI) of the LMO battery recycling are 12,57%, Rp 7.583.346.464,-, 5,85 years, and 2,39 respectively. Meanwhile, for LFP battery recycling, the values are 11,15%, -Rp 11.235.266.123,-, 6,23 years, and 2,32 respectively. These values indicate that LMO battery recycling is more promising than LFP battery recycling. In terms of sensitivity analysis, it is known that LMO and LFP battery recycling are more sensitive to changes in product prices than changes in reagent prices and OPEX values. CO₂ emissions in the LMO battery recycling process are lower than those from LFP batteries, resulting in more minimal environmental pollution. To minimize these gas emissions, the installation of wet scrubber equipment and the implementation of Carbon Capture and Storage (CCS)/Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) can be done.

*Penulis Korespondensi

E-mail: rini011@brin.go.id, rahm049@brin.go.id

Keywords: *Lithium Ion Battery; Techno-Economy; Battery Recycling; NPV; IRR; PBP; PI; Sensitivity Analysis; Pyrometallurgy*

1. Pendahuluan

1.1 Pendahuluan

Peningkatan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) menjadi salah satu faktor terjadinya perubahan iklim yang berdampak pada kenaikan temperatur global dan dapat memicu berbagai bencana, sehingga kondisi ini menjadi permasalahan global yang menjadi perhatian khusus bagi semua negara. Konvensi *Paris Agreement* 2016 merupakan upaya dunia dalam berkomitmen mengurangi emisi GRK dan mencegah dampak perubahan iklim (IPCC, 2018). Pada tahun 2019, emisi GRK global mencapai 49,76 GtCO₂eq, 17% dari total emisi ini atau sebesar 8,4 GtCO₂eq berasal dari sektor transportasi (WRI, 2022). Dalam mengurangi emisi pada sektor transportasi, negara-negara di dunia melakukan percepatan penggunaan kendaraan listrik. Sebagai salah satu bentuk kontribusi terhadap hal ini, Pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai untuk Transportasi Jalan.

Pada tahun 2017, penjualan kendaraan listrik secara global telah melampaui 3,1 juta unit. Dengan asumsi masa pakai baterai untuk kendaraan listrik selama 10 tahun, maka secara global volume baterai bekas dari kendaraan listrik akan mencapai akhir masa pakainya (*End Of Life*) pada tahun 2027 sebesar 0,8 juta metrik ton atau sekitar 25% dari 3,1 juta kendaraan listrik. Diperkirakan penjualan kendaraan listrik terus mengalami pertumbuhan dari 1,4 juta pada tahun 2017 menjadi 21,5 juta pada tahun 2030, sehingga mengakibatkan jumlah baterai bekas kendaraan listrik akan meningkat tajam setelah tahun 2027 (Dai et al., 2019). Untuk mengatasi penimbunan baterai bekas tersebut, daur ulang menjadi salah satu pilihan yang dapat dikembangkan dalam manajemen baterai kendaraan listrik yang telah habis pakai karena dapat berpotensi mengurangi dampak tercemarnya lingkungan dan mampu menjaga kemungkinan terjadinya lonjakan harga dan gangguan pasokan bahan baku baterai (Dai et al., 2019).

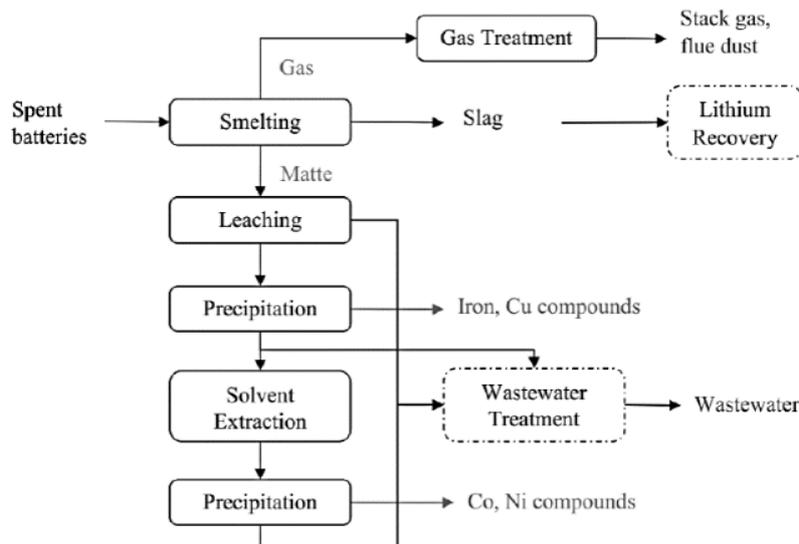
Sel baterai lithium terdiri dari katoda (elektroda positif), anoda (elektroda negatif), dan elektrolit. Terdapat lima tipe katoda baterai lithium yang umum digunakan, yaitu *lithium iron phosphate* (LFP), *lithium nickel cobalt aluminium oxide* (NCA), *lithium nickel manganese cobalt oxide* (NMC), *lithium cobalt* (LCO),

dan *lithium manganese oxide* (LMO) (ATIC, 2018). Setiap jenis baterai tersebut memiliki karakteristik dan harga yang berbeda-beda. Dapat dilihat pada **Tabel 1**, harga yang paling terjangkau adalah jenis baterai LMO dan LFP. Hal ini tentu menjadi potensi besar kedepannya karena 49% dari harga kendaraan listrik adalah baterainya (Kaya, 2022). Potensi yang terdapat dalam kerak bumi tercatat kandungan mangan (950 ppm) dan besi (6,3%) lebih tinggi dibandingkan nikel (84 ppm) dan kobalt (25 ppm), sehingga kondisi ini juga mendukung rendahnya harga baterai LMO dan LFP (Liu et al., 2021)(Frey & Reed, 2012). Baterai LMO dan LFP juga memiliki kelebihan lain, yakni lebih ramah lingkungan dan memiliki tingkat densitas daya, stabilitas, dan keamanan yang lebih baik dibandingkan jenis baterai lainnya, sehingga berpotensi untuk dikembangkan untuk lebih efisien dengan biaya yang rendah (Kaya, 2022); (Liu et al., 2021); (Yang et al., 2022). Pada tahun 2021, baterai tipe NMC masih menguasai pasar kendaraan listrik dunia dan juga Indonesia. Rata-rata kendaraan listrik di Indonesia menggunakan baterai NMC, seperti Hyundai dan hampir seluruh motor listrik di Indonesia. Namun, *International Energy Agency* memproyeksikan pada tahun 2030, kebutuhan baterai LFP dan LMO untuk kendaraan pribadi akan meningkat, sedangkan untuk NMC akan menurun (IEA, 2022).

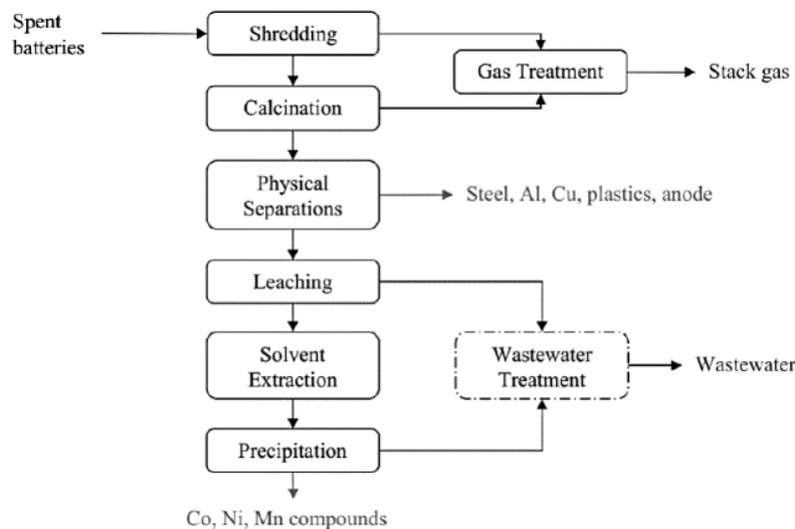
Daur ulang baterai dapat dilakukan dengan proses pirometalurgi atau hidrometalurgi. Proses pirometalurgi diawali dengan peleburan baterai pada temperatur tinggi, yang kemudian dilakukan pelarutan produk hasil peleburannya dengan bahan kimia untuk memperoleh logam besi, tembaga, kobalt, dan nikel. Proses hidrometalurgi diawali dengan penghancuran dan pengecilan ukuran baterai, kemudian dikalsinasi dan dilakukan pelarutan untuk memperoleh logam yang terkandung di baterai. Proses pirometalurgi memiliki kelebihan untuk baterai LFP dan LMO karena tidak mengandung nikel dan kobalt, sehingga alur prosesnya yang lebih sederhana, tidak memerlukan proses *pre-treatment*, dan teknologinya sudah mutakhir. Sedangkan proses hidrometalurgi lebih cocok untuk baterai yang mengandung nikel dan kobalt karena selektif dalam memperoleh logam tersebut, tetapi perlu *pre-treatment*

Tabel 1. Jenis Baterai dan Harga (Kaya, 2022)

Jenis Baterai	Rentang Harga/kg (\$)
LCO	40 - 77
NMC	50 - 95
NCA	75 - 107
LMO	23 - 40
LFP	35 - 50



Gambar 1. Alur Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai Secara Umum (Samarukha, 2020)



Gambar 2. Alur Proses Hidrometalurgi Daur Ulang Baterai Secara Umum (Samarukha, 2020)

terlebih dulu. (Thompson et al., 2021). Proses pirometalurgi dan hidrometalurgi dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.

Dalam kajian ini akan dibahas mengenai analisis biaya dari teknologi daur ulang baterai. Analisis biaya ini untuk menghitung CAPEX (*Capital Expenditure*) dan OPEX (*Operating Expenditure*) dari pabrik daur ulang baterai yang akan dibangun. CAPEX (*Capital Expenditure*) adalah jenis pengeluaran yang digunakan untuk aset fisik seperti properti, peralatan dan bangunan pabrik. Kelengkapan pendukung CAPEX dapat meliputi perangkat/peralatan pengoperasian, biaya penyimpanan, biaya pemulihan bencana dan keberlanjutan perusahaan, dan infrastruktur (Aprilian, 2019). OPEX (*Operating Expenditure*) atau biaya operasional adalah pengeluaran perusahaan yang digunakan untuk menjalankan bisnisnya setiap hari. Beberapa contoh dari OPEX adalah biaya sewa dan sewa peralatan, gaji dan tunjangan pegawai, biaya pembukuan, pajak properti, bahan-bahan kimia yang digunakan, dan bahan habis pakai lainnya (Ross, 2021).

Perhitungan CAPEX dan OPEX ini akan menghasilkan indikator yang digunakan untuk menilai

suatu proyek dan investasi. Indikator tersebut, antara lain NPV (*Net Present Value*), IRR (*Internal Rate of Return*), dan PBP (*Pay Back Period*) (Syazili et al., 2021). Hingga saat ini, belum ada pabrik daur ulang baterai yang komersial di Indonesia. Pemerintah Indonesia baru mencanangkan daur ulang baterai di konsorsium *Indonesian Battery Corporation* (IBC) yang akan mengintegrasikan pembangunan manufaktur baterai hingga daur ulang baterai di tahun 2024 (Dananjaya, 2021). Riset tekno-ekonomi daur ulang baterai terfokus di luar negeri, sedangkan di Indonesia belum ada. Hingga saat ini, Indonesia masih banyak terfokus pada riset teknologi dan optimalisasi proses, serta beberapa kajian kebijakan daur ulang baterai (Suryohendrasworo, 2021); (Muzayanha et al., 2019); (Fatimah et al., 2020); (Lander et al., 2021). Riset ini diharapkan dapat memberikan referensi pembangunan daur ulang baterai di Indonesia karena Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) memproyeksikan jumlah kendaraan listrik meningkat menjadi 15 juta unit pada tahun 2030, sehingga limbah baterai juga diprediksi akan turut mengalami peningkatan kedepannya (Rizaty, 2022).

Tabel 2. Komposisi Material yang Dapat Didaur Ulang pada Baterai LMO dan LFP (Samarukha, 2020)

Material	Konten Material (kg)	
	(dalam 1 kg sel baterai LMO)	(dalam 1 kg sel baterai LFP)
Lithium (pada katoda dan elektrolit)	0,017	0,016
Kobalt (pada katoda)	-	-
Nikel (pada katoda)	-	-
Mangan (pada katoda)	0,248	-
Tembaga	0,150	0,139
Aluminium	0,078	0,075
Grafit	0,141	0,168
Carbon black	0,027	0,022
PVDF	0,030	0,027
Plastik	0,021	0,019
Elektrolit organik	0,122	0,188
Besi (dalam bentuk logam oksida)	-	0,116
Fosfor (P)	0,004	0,007
Aluminium (dalam bentuk logam oksida)	-	-
Fluorin (F)	0,016	0,025

Tabel 3. Harga Material dari Proses Daur Ulang Baterai LMO dan LFP (Samarukha, 2020)

Material	Harga Unit (EUR/kg) (€)
Tembaga	5,54
Besi	0,25

1.2 Tujuan

Kajian studi ini memiliki tujuan untuk menganalisis tekno-ekonomi pabrik pirometalurgi daur ulang baterai LMO dan LFP di Indonesia dengan menghitung biaya kebutuhan investasi untuk pabrik tersebut dan biaya operasional untuk menjalankan pabrik tersebut. Perhitungan kedua hal tersebut untuk menentukan nilai suatu proyek yang akan mengundang para investor untuk menanam modal dalam pengembangan usahanya.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan

Dalam kegiatan studi analisis mengenai biaya tekno-ekonomi untuk daur ulang baterai secara pirometalurgi digunakan materi yang bersumber dari jurnal dan referensi buku bertaraf internasional yang telah dipublikasikan, sehingga dapat dijadikan acuan dalam perhitungan dalam kajian ini.

2.2. Metode

Studi analisis dilakukan melalui tahapan pencarian literatur melalui *browser*, yang kemudian dilakukan seleksi sumber referensi untuk dijadikan pedoman dalam perhitungan tekno-ekonomi yang diperlukan untuk proses daur ulang baterai secara pirometalurgi untuk skala *pilot*/komersial. Kemudian dibuat sebuah asumsi kondisi operasional pabrik berdasarkan referensi untuk menentukan total biaya peralatan yang akan digunakan. Total biaya peralatan ini akan menjadi dasar perhitungan CAPEX melalui referensi yang didapatkan. Setelah perhitungan CAPEX, ditinjau biaya operasional (OPEX) dari kebutuhan material, listrik, air, bahan bakar, dan juga gaji pegawai. Lokasi pembuatan pabrik juga ditentukan dengan referensi untuk menentukan Upah Minimum Regional (UMR) gaji pegawai. Keuntungan pabrik ini akan dihitung melalui penjualan dari produk yang dihasilkan, berupa tembaga dan besi. Hasil perhitungan

keuntungan, OPEX, dan CAPEX akan dianalisis untuk memperoleh indikator finansial yakni *Internal Rate of Return* (IRR), *Net Present Value* (NPV), *Profitability Index* (PI), dan *Payback Period* (PBP). Selain itu, juga dilakukan analisis sensitivitas untuk mengetahui dampak perubahan biaya atau pendapatan terhadap IRR dan dapat melakukan pengelolaan risiko yang mungkin dapat terjadi saat berlangsungnya proyek tersebut. Perhitungan indikator tersebut akan menggunakan *Microsoft Excel* untuk memudahkan analisis.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Perhitungan Revenue Proses Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

Di dalam perhitungan tekno-ekonomi dari proses daur ulang baterai LMO dan LFP, diasumsikan:

- Aktual proses daur ulang baterai selama 320 hari/tahun (asumsi waktu kerja bersih, tanpa perawatan peralatan) (Samarukha, 2020).
- Umur operasional pabrik 10 tahun (Samarukha, 2020).
- Kapasitas *input* baterai 8.000 ton/tahun (asumsi 25% dari jumlah kendaraan listrik yang teregistrasi di Indonesia, yakni sebanyak 31.827 unit) (Alfarizi, 2022) (Dai et al., 2019).
- Menggunakan metode *continuous process* (Samarukha, 2020).
- Peralatan daur ulang baterai LFP dan LMO sama karena menggunakan proses yang sama, yakni pirometalurgi (Samarukha, 2020).

Di dalam melakukan analisa *revenue* dari proses daur ulang baterai, perlu diketahui bahwa jumlah material yang dapat didaur ulang bergantung pada komposisi kimia baterai. Pada **Tabel 2**, disajikan komposisi materi pada sel baterai LMO dan LFP dalam persen massa (Samarukha, 2020). Harga logam tembaga dan besi secara umum di dunia tersaji dalam **Tabel 3**,

Tabel 4. Total Revenue dari Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

Jenis Baterai	Kandungan Logam (per 1 kg Baterai)	Recovery Logam (%)	Harga Material (EUR/kg) *)Merujuk Tabel 3	Keuntungan per 1 kg Baterai (EUR)	Keuntungan		Ref. Perhitungan
					Rupiah/kg	Rupiah/Tahun	
LMO	0,150 kg Cu	90	5,54	0,75	12.210,22	97.681.723.200	Pers. (1) dan (2)
LFP	0,139 kg Cu	90	5,54	0,69	11.314,80	90.518.396.832	
	0,116 kg Fe	90	0,25	0,03	426,11	3.408.868.800	

dimana kedua logam tersebut merupakan *output* produk yang dapat diperoleh dari daur ulang LFP dan LMO. (Samarukha, 2020) Kurs Euro per 6 Desember 2021 adalah Rp 16.326,-.

Berdasarkan parameter-parameter proses yang telah dijelaskan sebelumnya, dengan asumsi *recovery* 90%, maka dapat ditentukan rumus perhitungan *revenue* pada proses daur ulang baterai LMO dan LFP adalah sebagai berikut (Samarukha, 2020).

$$\text{Berat Kandungan Logam yang Di-recovery} \times \text{Harga Material (Euro/kg)} \times \text{Persentase Recovery Logam} = \text{Keuntungan Daur Ulang Baterai Bekas (Euro/kg)} \dots \dots \dots (1)$$

Maka keuntungan (*revenue*) yang didapatkan per tahunnya, jika dikonversi ke dalam rupiah adalah sebagai berikut.

$$\text{Keuntungan Daur Ulang Baterai Bekas (Euro/kg)} \times \text{Kapasitas Input Baterai per Tahun (kg/tahun)} \times \text{Rp 16.326/Euro} = \text{Keuntungan Daur Ulang Baterai (Rupiah/tahun)} \dots \dots \dots (2)$$

Pada proses peleburan pada pirometalurgi, sebagian besar kandungan organik seperti polimer, plastik, fosfor, dan elektrolit terbakar menjadi energi panas dan tidak bisa diperoleh kembali. Pada proses ini ditambahkan kapur dan pasir untuk membantu terjadinya peleburan dan reaksi oksidasi-reduksi pada temperatur tinggi, sehingga logam nikel, kobalt, tembaga, dan besi tereduksi dan melebur menjadi lelehan logam, sedangkan grafit, mangan, karbon, lithium, dan aluminium teroksidasi menjadi pengotor (*slag*) yang terpisah dari lelehan logam (Makuza et al., 2021). Lelehan logam ini diambil dan didinginkan pada suhu ruangan, kemudian dilarutkan dengan asam klorida dan hidrogen peroksida. Besi dan aluminium diendapkan terlebih dahulu dengan kapur untuk dipisahkan dengan logam nikel dan kobalt. Nikel dan kobalt dipisahkan dan diperoleh dengan cara *solvent extraction* menggunakan bahan kimia tertentu. Mangan, lithium, dan aluminium belum bisa diperoleh dari *slag* karena masih perlu pengembangan lebih lanjut pada skala komersial (Samarukha, 2020).

Baterai *lithium manganese oxide* (LiMn₂O₄, Li₂MnO₅, atau LMO) adalah jenis baterai Li-ion yang tidak mengandung nikel dan kobalt. Tembaga adalah produk *output* yang dihasilkan dari satu kg sel baterai LMO yang didaur ulang menggunakan proses pirometalurgi, sehingga untuk melakukan *recovery* logam tersebut, tidak perlu sampai pada tahapan

solvent extraction. Mengacu dari penelitian oleh Samarukha, perhitungan *revenue* ini menggunakan asumsi perolehan (*recovery*) tembaga 90% dan berdasarkan komposisi material baterai yang menjadi umpan baterai bekas LMO pada **Tabel 2**, diketahui bahwa kandungan tembaga dari 1 kg sel baterai LMO adalah 0,150 kg, sehingga diperoleh logam tembaga yang dihasilkan sebesar 1.080 ton/tahun dengan nilai keuntungan daur ulang baterai LMO sebesar Rp 12.210,22,-/kg sel baterai LMO (Rp 97.681.723.200,-/tahun) (Samarukha, 2020).

Sama seperti baterai LMO, baterai *lithium iron phosphate* (LiFePO₄) atau baterai LFP (*lithium ferro phosphate*) juga tidak mengandung unsur nikel dan kobalt, sehingga tidak memerlukan proses hingga tahap *solvent extraction*, melainkan hanya sampai tahapan presipitasi saja untuk memperoleh besi dan tembaga yang menjadi keuntungan di akhir hasil produksi baterai LFP. Kandungan tembaga dan besi pada baterai bekas LFP per 1 kg sebesar 0,139 kg dan 0,116 kg (lihat **Tabel 2**) (Samarukha, 2020). Apabila *recovery* tembaga dan besi dari daur ulang baterai LFP sebesar 90%, maka diperoleh jumlah logam tembaga dan logam besi yang dihasilkan sebesar 1.836 ton/tahun dengan nilai keuntungan daur ulang baterai LFP mencapai sebesar Rp 11.740,91,-/kg sel baterai LMO (Rp 93.927.265.632,-/tahun) (Samarukha, 2020). Seluruh rangkuman perhitungan *revenue* dari proses daur ulang baterai LMO dan LFP menggunakan metode pirometalurgi ini disajikan dalam **Tabel 4**.

Berdasarkan perhitungan total *revenue* yang dihasilkan oleh masing-masing proses daur ulang baterai, maka dapat diketahui total keuntungan yang didapatkan dari daur ulang pirometalurgi dari baterai LMO lebih besar dibandingkan baterai LFP. Hal ini dikarenakan kandungan logam tembaga yang terkandung di dalam baterai LMO lebih tinggi dibandingkan baterai LFP, meskipun memiliki persentase *recovery* logam yang sama (90%) dan memiliki kandungan besi untuk di-*recovery*.

3.2. Analisis Perhitungan CAPEX Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

Pemilihan peralatan yang digunakan untuk proses pirometalurgi antara lain: (Samarukha, 2020)

- *Hopper* untuk wadah masuk bahan baku.
- *Smelter* untuk melebur baterai.
- *Granulator* untuk menyiapkan hasil peleburan sebelum dilarutkan.
- *Conveyor* untuk transportasi material.
- *Leaching tank* untuk melarutkan material.

Tabel 5. Harga Peralatan (Argonne National Laboratory, 2018) (Matche, 2014) (Globalsources, 2021) (Mular A.L, 1999)

Nama Peralatan	Harga Unit (Tahun 2014) (Rp)	Harga Estimasi Unit (Tahun 2021) (Rp)
Hopper	558.557.100,-	619.226.051,-
Smelter	63.516.746.400,-	70.415.762.391,-
Granulator	285.773.400,-	316.813.328,-
Conveyor	1.480.825.800,-	1.641.669.065,-
Leaching Tank	1.313.403.000,-	1.456.061.256,-
Precipitation Tank	1.313.403.000,-	1.456.061.256,-
Filter Press	2.496.909.000,-	2.768.116.455,-
Slurry Pump	43.428.897,-	48.146.026,-
Wet Scrubber	1.082.475.000,-	1.200.050.486,-
Wheel Loader	1.082.475.000,-	1.200.050.486,-
TOTAL	73.173.996.597,-	81.121.956.801,-

Tabel 6. Rincian CAPEX Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai LMO dan LFP (Peters et al., 2003)

No	Indikator CAPEX	Faktor Estimasi	Biaya (Rp)
1	I. Biaya Langsung	2+8+9+10	229.575.137.746,-
2	A. Peralatan	3+4+5+6+7	154.131.717.921,-
3	i. Biaya Peralatan	Total Harga Peralatan	81.121.956.801,-
4	ii. Biaya Instalasi	40% dari (3)	32.448.782.720,-
5	iii. Instrumentasi	20% dari (3)	16.224.391.360,-
6	iv. Perpipaan	20% dari (3)	16.224.391.360,-
7	v. Kelistrikan	10% dari (3)	8.112.195.680,-
8	B. Bangunan dan Pendukungnya	25% dari (3)	20.280.489.200,-
9	C. Fasilitas Jasa	60% dari (3)	48.673.174.080
10	D. Lahan	8% dari (3)	6.489.756.544,-
11	II. Biaya Tidak Langsung	12+13+14	57.393.784.436,-
12	A. Supervisi Pembangunan	10% dari (1)	22.957.513.775,-
13	B. Biaya Konstruksi dan Kontraktor	10% dari (1)	22.957.513.775,-
14	C. Kontingensi	5% dari (1)	11.478.756.887,-
15	III. Biaya Modal Tetap	1+11	286.968.922.182,-
16	IV. Modal Kerja	10% dari (15)	28.696.892.218,-
17	V. Total Modal Investasi	15+16	315.665.814.400,-

- *Precipitation tank* untuk mengendapkan besi dan tembaga dari larutan *leaching tank*.
- *Filter press* untuk mengeringkan endapan.
- *Slurry pump* untuk memindahkan larutan.
- *Wet scrubber* untuk menangkap bahan dan senyawa gas yang berbahaya dari peleburan.
- *Wheel loader* sebagai alat berat untuk memindahkan material.

Peralatan yang dipilih menyesuaikan kapasitas *output* karena biaya peralatan akan berbeda pada spesifikasi yang berbeda. Pada daur ulang baterai LMO, akan dihasilkan 1.080 ton/tahun atau 0,14 ton/jam, sedangkan pada daur ulang baterai LFP akan dihasilkan 1.836 ton/tahun atau 0,239 ton/jam. Dari rujukan biaya peralatan yang digunakan, peralatan kedua daur ulang baterai tersebut menggunakan peralatan yang sama (Argonne National Laboratory, 2018).

Biaya peralatan merujuk ke data *global sources*, Matches dan EverBatt yang menampilkan harga berbagai peralatan pada tahun 2014 (Argonne National Laboratory, 2018); (Matche, 2014); (Globalsources, 2021). Oleh karena itu, diperlukan faktor pengali untuk mengestimasi harga pada tahun 2021. Pada kajian ini, digunakan indeks *Marshall and Swift (M&S) Cost Index (Mill & Mining)* dari buku *Capcost* (Mular A.L, 1999). Adapun pada buku *Capcost* tersebut, tidak ada indeks

tahun 2021, melainkan hanya dalam rentang tahun 1950 sampai 1996, sehingga data tersebut perlu diestimasi dengan ekstrapolasi regresi linier untuk mengestimasi indeks tahun 2021 (Dutt Gupta S & Rajesh, 2011). Kurs 1 USD ke Rupiah pada 6 Desember 2021 adalah Rp 14.433,-. Perhitungan harga peralatan pada tahun 2021 sebagai berikut:

$$\text{Harga Peralatan Tahun 2014 (USD)} \times \text{Indeks (M\&S) Cost Index (Mill \& Mining) Tahun 2021} \times \text{Rp 14.433,- /USD} = \text{Harga Peralatan pada Tahun 2021 (Rupiah)} \dots \dots \dots (3)$$

Total biaya peralatan ini akan menjadi acuan dalam perhitungan CAPEX lainnya, seperti biaya instalasi, perpipaan, kelistrikan, konstruksi, kontingensi, bangunan, dan infrastruktur pendukungnya berdasarkan referensi perhitungan pembangunan pabrik secara umum yang dikembangkan oleh Peters, dkk., sehingga akan didapatkan total modal investasi keseluruhan atau CAPEX (Peters et al., 2003). Pada **Tabel 6** merupakan perhitungan CAPEX proses pirometalurgi daur ulang baterai LFP dan LMO secara keseluruhan. Adapun total CAPEX yang diperoleh, yakni sebesar Rp 315.665.814.400,- untuk kedua jenis baterai ini karena

Tabel 7. Biaya Bahan atau *Reagen* pada Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai (Samarukha, 2020)

Material	Biaya Konsumsi Bahan Kimia (Euro/kg per Bahan Kimia)	Kebutuhan Bahan <i>Reagen</i> (kg/1 kg Sel Baterai)
Asam Klorida	0,13	0,21
Hidrogen Peroksida	0,62	0,06
Kapur	0,11	0,30
Pasir	0,05	0,15

Tabel 8. Total Biaya Bahan atau *Reagen* dari Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

<i>Reagen</i>	Biaya Konsumsi <i>Reagen</i> (EUR/1 kg Sel Baterai) *) Merujuk Tabel 7	Total Biaya Bahan yang Dikonsumsi atau <i>Reagen</i>	
		Rupiah/Kg (Rp)	Rupiah/Tahun (Rp)
Asam Klorida	0,0273	445,70	3.565.598.400
Hidrogen Peroksida	0,0372	607,33	4.858.617.600
Kapur	0,033	538,76	4.310.064.000
Pasir	0,0075	122,45	979.560.000
Total		1.714,23	13.713.840.000

menggunakan peralatan yang sama untuk proses pirometalurgi (Samarukha, 2020).

3.3. Analisis Perhitungan OPEX Proses Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

Untuk mengembangkan model biaya operasional proses daur ulang baterai, diperlukan suatu model biaya produksi di dalam suatu pabrik kimia generik, dengan modifikasi yang diadopsi untuk keperluan proses daur ulang baterai (Samarukha, 2020). Pembuatan *pilot plant* ini juga memerlukan analisa biaya operasional atau OPEX untuk menentukan bagaimana *cash flow*-nya agar dapat memperoleh nilai *Break Even Point* (BEP) dan *Internal Rate of Return* (IRR), yang menjadi salah satu indikator untuk menarik investor memberikan investasi pada pabrik ini. Biaya operasional ini harus dijabarkan terlebih dahulu dimulai dari banyaknya *reagen* atau bahan yang diperlukan, biaya pekerja, biaya kelistrikan, biaya air, dan juga biaya bahan bakar yang diperlukan.

Dalam kajian ini, pabrik diasumsikan akan dibangun di Kendal *Industrial Park*, Jawa Tengah. Lokasi ini dipilih dikarenakan beberapa alasan, yaitu: (1) terletak di wilayah strategis di dekat pelabuhan Tanjung Emas, Semarang dan dibangun fasilitas pelabuhan khusus kawasan industri, dekat dengan akses tol Trans Jawa, dilalui jalur kereta api, serta didukung oleh kestabilan jaringan transmisi listrik karena berada di Jawa dan infrastruktur pendukung lainnya; (2) biaya jasa tenaga kerja yang masih terjangkau, dimana Upah Minimum Regional (UMR) Kendal berkisar Rp 2.508.300,-, dimana nominal tersebut jauh lebih terjangkau dibandingkan dengan UMR Karawang yang mencapai Rp 4.798.312,-; (3) terdapat insentif fiskal dan nonfiskal (KIK, 2020) (Dinas Kominfo Jateng, 2022) (Kompas.com, 2021). Adapun cakupan perhitungan biaya operasional (OPEX) dalam proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi, meliputi biaya bahan baku, biaya bahan yang dikonsumsi atau *reagen*, dan biaya kebutuhan energi (konsumsi listrik, konsumsi air, konsumsi bahan bakar, dan biaya tenaga kerja).

a. Biaya Raw Material

Untuk bahan baku yang diperlukan di dalam proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi ini diasumsikan bahan baku

didapatkan melalui kerja sama mitra/industri produsen baterai, sehingga ditargetkan tidak ada pengeluaran untuk biaya bahan baku.

b. Biaya Bahan yang Dikonsumsi atau *Reagen*

Di dalam suatu proses daur ulang baterai skala *pilot/komersial*, sangat diperlukan data mengenai kebutuhan konsumsi bahan/*reagen* dan energi yang diperlukan. Pada **Tabel 7**, dapat diketahui biaya dan bahan *reagen* yang diperlukan untuk mendaur ulang 1 kg sel baterai lithium dengan menggunakan metode pirometalurgi. Dalam konteks ini, diasumsikan bahwa biaya *reagen* bersifat umum di seluruh dunia dan jumlah *reagen* yang sama digunakan untuk daur ulang baterai LMO dan LFP melalui proses pirometalurgi. (Samarukha, 2020). Berdasarkan **Tabel 7**, maka dapat diketahui rumus perhitungan biaya konsumsi bahan kimia sebagai *reagen* untuk proses daur ulang baterai LMO dan LFP menggunakan metode pirometalurgi adalah sebagai berikut (Samarukha, 2020):

$$\text{Harga } Reagen \text{ dalam Euro/kg} \times \text{Kebutuhan } Reagen \text{ dalam kg} = \text{Total Biaya Kebutuhan } Reagen \text{ per kg Sel Baterai (Euro/kg)} \dots\dots\dots(4)$$

Maka total biaya biaya bahan atau *reagen* yang diperlukan dalam proses produksi daur ulang baterai per tahunnya, jika dikonversi ke dalam rupiah adalah sebagai berikut.

$$\text{Total Biaya Kebutuhan } Reagen \text{ per kg Sel Baterai (Euro/kg)} \times \text{Kapasitas Input Baterai per Tahun (kg/tahun)} \times \text{Rp 16.326,- (kurs Euro ke Rupiah per 6 Desember 2021)} = \text{Total Biaya Kebutuhan } Reagen \text{ per Tahun (Rupiah/tahun)} \dots\dots\dots(5)$$

Berdasarkan **Tabel 7**, maka dapat dilakukan perhitungan biaya konsumsi bahan kimia sebagai *reagen* untuk proses daur ulang baterai LMO dan LFP menggunakan metode pirometalurgi yang disajikan dalam **Tabel 8**.

Tabel 9. Total Biaya Energi dari Proses Pirometalurgi Daur Ulang Baterai LMO dan LFP

Jenis Energi	Kebutuhan Energi	Biaya Kebutuhan Energi (Rp)	Total Biaya Energi per Tahun (Baterai LMO)	Total Biaya Energi per Tahun (Baterai LFP)	Rujukan Perhitungan
			Rupiah/Tahun (Rp)	Rupiah/Tahun (Rp)	
Listrik	1,3 kWh/kg sel baterai	1.114,74,-/kWh	11.593.296.000	11.593.296.000	Pers. (6), (7), (8), dan (9)
Air	LMO: 5,8 liter/kg sel baterai LFP: 5,69 liter/kg sel baterai	13,88,-/liter	644.032.000	631.817.600	Pers. (10)
Bahan Bakar	20 liter/jam	5.150,-/liter	791.040.000	791.040.000	Pers. (11)
Tenaga Kerja	20 orang	2.508.300,-/jam	601.992.000	601.992.000	Pers. (12)
Total			13.630.360.000	13.618.145.600	

c. Biaya Konsumsi Listrik

Biaya konsumsi listrik merujuk pada tarif dasar listrik yang ditetapkan oleh PLN Bulan Oktober - Desember 2021 untuk industri sebesar Rp 1.114,74,- (PLN, 2021). Sebelum menghitung besarnya biaya konsumsi listrik, energi yang dibutuhkan pada proses daur ulang tiap jenis baterai dikonversikan ke dalam satuan kWh, maka didapatkan daya listrik dengan rumus:

$$\text{Energi Listrik (MJ)} \times 0,278 \text{ kWh/MJ} = \text{Daya Listrik per kg Baterai (kWh)} \dots\dots\dots(6)$$

Maka, biaya listrik yang dibutuhkan dalam proses produksi skala industri per tahunnya adalah sebagai berikut.

$$\text{Daya Listrik per kg Baterai (kWh)} \times \text{Kapasitas Input Baterai per Tahun} = \text{Daya Listrik per Tahun (kWh/tahun)} \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{Daya Listrik per Tahun (kWh)} \times \text{Tarif Listrik per kWh} = \text{Biaya Konsumsi Listrik per Tahun} \dots\dots\dots(8)$$

Dalam proses daur ulang 1 kg sel baterai LMO dan LFP masing-masing diperlukan energi sebesar 4,68 MJ (Samarukha, 2020). Energi ini sudah mencakup keseluruhan proses peralatan di pabrik termasuk *smelter, wet scrubber, leaching tank, precipitation tank* dan peralatan lainnya. Apabila energi ini dikonversikan ke dalam satuan kWh, maka didapatkan daya listrik sebesar:

$$4,68 \text{ MJ/kg} \times 0,278 \text{ kWh/MJ} = \mathbf{1,3 \text{ kWh/kg}} \dots\dots\dots(9)$$

Maka, biaya listrik yang dibutuhkan dalam proses produksi skala industri per tahunnya disajikan dalam **Tabel 9**.

d. Biaya Konsumsi Air

Dalam proses daur ulang baterai, diperlukan air terutama untuk tahapan pelarutan di dalam *leaching*

tank dan untuk keperluan lainnya (Samarukha, 2020). Adapun rumus perhitungan biaya air yang dibutuhkan dalam proses produksi skala industri per tahunnya adalah sebagai berikut.

$$\text{Kebutuhan Air untuk Daur Ulang Baterai (liter/kg)} \times \text{Kapasitas Input Baterai per Tahun} \times \text{Tarif Air/liter} = \text{Biaya Konsumsi Air per Tahun (Rupiah/tahun)} \dots\dots\dots(10)$$

Diasumsikan konsumsi air dalam daur ulang 1 kg baterai bekas LFP merujuk pada penelitian oleh Samarukha, membutuhkan 5,69 liter air pada proses pirometalurgi, sedangkan untuk daur ulang 1 kg baterai LMO membutuhkan 5,8 liter air. Tarif air merujuk pada Peraturan Bupati Kendal Nomor 90 Tahun 2008 yang mengatur harga Rp 13.880,-/m³ untuk industri besar atau Rp 13,88,-/liter (Perbup Kendal, 2008). Oleh karena itu, penggunaan air daur ulang baterai LMO dan LFP dalam proses produksi skala industri per tahunnya disajikan dalam **Tabel 9**.

e. Biaya Konsumsi Bahan Bakar

Di dalam proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi, dibutuhkan penggunaan diesel untuk transportasi logistik. Untuk menggunakan diesel ini, tentu dibutuhkan bahan bakar biosolar. Perhitungan biaya bahan bakar biosolar untuk proses daur ulang pirometalurgi baterai LMO dan LFP per tahunnya adalah sebagai berikut.

$$\text{Volume Penggunaan Diesel (liter/jam)} \times \text{Waktu Operasi Pabrik per Tahun} \times \text{Harga Bahan Bakar (Rupiah/liter)} = \text{Biaya Konsumsi Bahan Bakar per Tahun (Rupiah/tahun)} \dots\dots\dots(11)$$

Diasumsikan penggunaan diesel untuk transportasi logistik dalam lingkungan pabrik sebesar 20 liter/jam dan untuk harga bahan bakar biosolar (per 6 Desember 2021) adalah Rp 5.150,- per liter (Samarukha, 2020). Oleh karena itu, untuk

kebutuhan bahan bakar pada proses daur ulang pirometalurgi baterai LMO dan LFP per tahunnya disajikan dalam **Tabel 9**.

f. Biaya Tenaga Kerja

Tenaga kerja pada daur ulang baterai diperlukan untuk menjalankan proses dan seluruh tahapan dari bahan baku sampai bahan jadi. Berikut ini adalah perhitungan biaya tenaga kerja yang dibutuhkan di dalam proses daur ulang baterai LMO dan LFP ini.

$$\text{Jumlah Tenaga Kerja} \times \text{Biaya Tenaga Kerja per Bulan} \times 12 \text{ Bulan/Tahun} = \text{Biaya Tenaga Kerja per Tahun (Rupiah/tahun)} \dots\dots\dots(12)$$

Diasumsikan tenaga kerja yang diperlukan sebanyak 20 orang dengan rincian 4 orang untuk pengelolaan bahan baku, 4 orang untuk proses peleburan, 4 orang untuk proses pelarutan, dan 8 orang untuk keperluan umum. Biaya tenaga kerja merujuk pada UMR Kendal sebesar Rp 2.508.300,-/bulan (KIK, 2020). Adapun nilai perhitungan biaya tenaga kerja yang dibutuhkan di dalam proses daur ulang baterai LMO dan LFP disajikan dalam **Tabel 9**.

Berdasarkan perhitungan seluruh OPEX di atas, maka dapat diketahui total biaya operasional proses daur ulang baterai secara pirometalurgi, yang meliputi biaya bahan atau *reagen* (lihat **Tabel 8**) dan seluruh komponen biaya energi (lihat **Tabel 9**), mencapai Rp 27.344.200.000,- untuk baterai LMO dan Rp 27.331.985.600,- untuk baterai LFP.

3.4. Analisis Perhitungan Internal Rate of Return (IRR), Net Present Value (NPV), Pay Back Period (PBP), dan Profitability Index (PI)

Internal Rate of Return (IRR) adalah indikator untuk mengetahui tingkat efisiensi dari sebuah investasi. IRR juga dikenal sebagai metode untuk menghitung tingkat bunga suatu investasi dan menyamakannya dengan nilai investasi saat ini berdasarkan perhitungan kas bersih di masa mendatang. IRR dapat dijadikan sebuah indikator dari tingkat efisiensi sebuah investasi (Rizeki, 2022).

Sebuah proyek atau investasi dapat dilakukan apabila laju pengembaliannya (*rate of return*) lebih besar dari laju pengembalian investasi lain. Selain itu, IRR berfungsi untuk menentukan apakah suatu investasi dapat dilaksanakan atau tidak, dimana biasanya dipakai dengan acuan bahwa investasi yang telah dilakukan harus lebih tinggi dari *Minimum Acceptable Rate of Return* (MARR). MARR adalah laju pengembalian minimum dari suatu investasi yang berani dilakukan oleh investor, sehingga biasanya nilai MARR ditentukan oleh investor atau perusahaan (Ailima, 2022).

Net Present Value (NPV) merupakan indikator untuk mengukur biaya dan keuntungan yang memperhitungkan inflasi serta faktor waktu, sehingga lebih realistis (Purnatiyo, 2013). NPV ini berguna untuk mengukur modal dan perencanaan investasi

(Paddle, 2022). Suku bunga IRR diperoleh jika NPV = 0, artinya suku bunga yang dapat diberikan investasi yang memberikan NPV sama dengan 0. Syarat utamanya adalah IRR > suku bunga MARR. Untuk memperoleh hasil akhir sebuah perhitungan IRR, kita harus mencari terlebih dahulu nilai dari *discount rate* yang menghasilkan NPV positif. Menentukan NPV bisa didapatkan menggunakan *software* Microsoft Excel atau dengan rumus berikut ini (Paddle, 2022).

$$NPV = -C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_T}{(1+r)^T} \dots\dots(12)$$

Keterangan:

- C₀ = *Initial Investment*
- C = *Cash Flow*
- R = *Discount Rate*
- T = *Time*

Untuk menentukan *Internal Rate of Return* (IRR), dapat dihitung juga dengan Microsoft Excel atau dengan rumus sebagai berikut (Rizeki, 2023):

$$IR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} (i_2 - i_1) \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan:

- i₁ = Tingkat Diskonto yang Akan Menghasilkan NPV Positif
- i₂ = Tingkat Diskonto yang Akan Menghasilkan NPV Negatif
- NPV₁ = *Net Present Value* yang Bernilai Positif
- NPV₂ = *Net Present Value* yang Bernilai Negatif

Payback Period (PBP) merupakan waktu yang diperlukan untuk mengembalikan modal awal. Jika waktu yang diperlukan lebih cepat, maka proyek akan lebih menarik untuk diinvestasikan dibandingkan dengan waktu pengembalian yang lebih lama. Perhitungan PBP ini juga dapat ditentukan melalui Microsoft Excel (Purnatiyo, 2013).

Indikator lainnya untuk membantu penilaian proyek adalah *profitability index* (PI). PI adalah indeks yang menjelaskan hubungan biaya dan keuntungan suatu proyek. Indeks ini dihitung dari rasio nilai saat ini untuk nominal kas ke depannya atau *present value* (PV) dan modal investasi di awal proyek. Jika nilai indeks PI > 1, maka proyek tersebut merupakan proyek yang menguntungkan dan bagus untuk diinvestasikan, sedangkan jika PI < 1, maka akan merugikan investor yang masuk ke dalam proyek tersebut (Chen, 2023).

Untuk perhitungan indikator finansial yang sudah disebutkan sebelumnya pada proses daur ulang baterai LFP dan LMO, diasumsikan:

- *Discount rate* = 12%. (Mercer Capital, 2021)
- Permodalan CAPEX menggunakan skema 70% modal sendiri dan 30% peminjaman dari bank dengan tenor 10 tahun.
- Nilai MARR ditentukan oleh investor atau perusahaan, namun pada studi ini MARR diasumsikan dengan (persentase pinjaman x (suku bunga + *country risk premium*) + (persentase modal x (suku bunga modal))).

Tabel 10. Indikator Finansial Daur Ulang Baterai LFP dan LMO

Indikator	Baterai LFP	Baterai LMO
IRR	11,15%	12,57%
NPV	-Rp 11.235.266.123,-	Rp 7.583.346.464,-
PBP	6,23 tahun	5,85 tahun
PI	2,32	2,39

- Suku bunga 10% dan *country risk premium* 1,84%. (Big Brothers, 2021)
- Nilai MARR yang diperoleh = 11,48%.
- Waktu perhitungan sampai tahun ke-10 mengikuti umur pabrik.
- Pajak 11%.

Dengan menggunakan asumsi di atas dan nilai CAPEX Rp 315.665.814.400,- untuk daur ulang baterai LMO dan LFP serta OPEX Rp 27.344.200.000,- untuk baterai LMO dan Rp 27.331.985.600,- untuk baterai LFP, maka didapatkan nilai indikator IRR, NPV, PBP, dan PI untuk daur ulang baterai LMO dan LFP menggunakan Microsoft Excel yang tersaji pada **Tabel 10**.

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 10**, dapat terlihat daur ulang baterai LMO lebih menjanjikan dibandingkan daur ulang baterai LFP. Pertama, pada daur ulang baterai LMO, nilai IRR-nya lebih besar dibandingkan baterai LFP dan juga nilai $IRR > MARR$, sehingga dapat dikatakan layak untuk diinvestasikan, sedangkan pada baterai LFP, nilai $IRR < MARR$, sehingga kurang layak diinvestasikan (Purnatiyo, 2013). Kedua, nilai NPV pada baterai LMO bernilai positif, sehingga dapat diartikan pada tahun ke-10, investor mengalami keuntungan dibandingkan dengan NPV baterai LFP yang masih negatif, yang menunjukkan investor akan mengalami kerugian. Ketiga, jika ditinjau dari PBP, waktu untuk modal kembali pada baterai LMO lebih singkat, yakni 5,85 tahun atau sekitar 5 tahun 10 bulan, dibandingkan dengan baterai LFP yang perlu waktu 6,23 tahun atau sekitar 6 tahun 2 bulan. Indeks PI keduanya di atas 1 menunjukkan keduanya layak untuk diinvestasikan (Chen, 2023).

Perbedaan hasil ini dapat dijelaskan karena perbedaan kandungan logam pada baterai LFP dan LMO. Baterai LMO hanya mengandung tembaga, tetapi kandungannya lebih banyak dibandingkan baterai LFP. Walaupun baterai LFP mengandung sejumlah besi yang dapat diperoleh dan dijual serta biaya operasional yang sedikit lebih murah, tetapi kandungan tembaga yang lebih sedikit menjadi penyebab keuntungan LFP lebih kecil dibandingkan dengan LMO.

Untuk mendapatkan nilai $IRR > MARR$ dan nilai positif NPV pada daur ulang baterai LFP, diperlukan perhitungan finansial lebih dari 10 tahun. Hal ini dikarenakan setelah tahun ke-10, tenor pinjaman bank sudah lunas, sehingga tidak perlu membayar pinjaman lagi. Aliran kas yang masuk akan lebih besar dibandingkan sebelumnya dan akan meningkatkan nilai NPV dan IRR. Selain dari aspek finansial, aspek teknologi juga dapat diperhatikan untuk mengoptimalkan keuntungan. Salah satunya adalah mengembangkan teknologi yang dapat memperoleh lithium dari *slag* hasil peleburan atau mengembangkan teknologi proses yang dapat mencegah kehilangan

lithium, seperti teknologi *pyrolysis pretreatment* (Makuza et al., 2021). Pemilihan peralatan yang lebih efektif dan efisien juga perlu dilakukan untuk meminimalisir CAPEX.

Upaya lain dalam meningkatkan kelayakan daur ulang baterai LFP adalah dengan proses hidrometalurgi. Meskipun membutuhkan bahan atau *reagen* yang lebih banyak dibandingkan pirometalurgi, proses hidrometalurgi dapat memperoleh kembali logam litium yang terkandung didalamnya (Argonne National Laboratory, 2018).

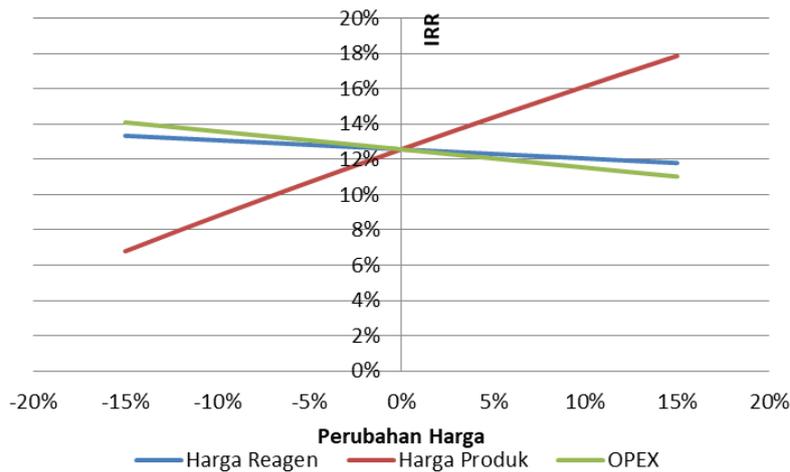
3.5. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas merupakan metode untuk menghitung dampak suatu perubahan variabel terhadap nilai proyek. Perubahan variabel ini bisa memberikan penilaian terhadap investor untuk mengukur dan menentukan resiko pada suatu proyek (Nwanekezie et al., n.d.). Tujuan analisis sensitivitas antara lain:

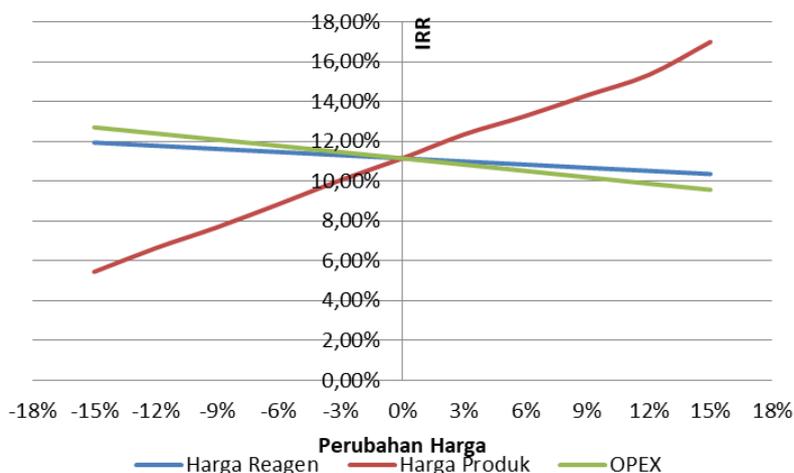
1. Untuk membantu mengidentifikasi variabel kunci yang mempengaruhi biaya dan keuntungan suatu proyek.
2. Untuk melihat konsekuensi yang kemungkinan terjadi akibat perubahan variabel kunci tersebut.
3. Untuk menilai apakah variabel tersebut mempengaruhi pengambilan keputusan.
4. Untuk mengidentifikasi langkah untuk melakukan mitigasi atas perubahan tersebut.

Pada proyek pirometalurgi daur ulang baterai LMO dan LFP ini, perlu ditentukan variabel yang mempengaruhi IRR. IRR merupakan indikator yang paling banyak digunakan untuk menilai suatu proyek (Nwanekezie et al., n.d.). Pada studi ini dipilih tiga variabel, yaitu harga produk, harga *reagen*, dan OPEX. Harga produk atau harga logam yang akan dijual dipilih karena menjadi variabel vital dalam menghasilkan keuntungan dan harga logam di pasar dunia mengalami fluktuatif harga. Harga *reagen* dipilih karena proses daur ulang ini memerlukan *reagen* untuk beroperasi dan juga harga *reagen* yang fluktuatif. OPEX dipilih untuk melihat secara keseluruhan pengaruhnya terhadap nilai IRR.

Pada studi ini, perhitungan sensitivitas dilakukan dengan skenario perubahan harga ketiga variabel tersebut dari -15% sampai 15% yang dapat dilihat pada **Gambar 3** untuk daur ulang baterai LMO dan **Gambar 4** untuk daur ulang baterai LFP. Secara umum, perubahan ketiga variasi tersebut tidak ada yang membuat nilai IRR negatif. Terlihat dari kedua grafik tersebut, perubahan harga produk atau harga logam yang dijual, lebih signifikan pengaruhnya terhadap perubahan IRR. Pada daur ulang baterai LMO dan LFP, perubahan harga *reagen* dan OPEX cenderung lebih landai dibandingkan perubahan harga



Gambar 3. Grafik Sensitivitas Daur Ulang Baterai LMO



Gambar 4. Grafik Sensitivitas Daur Ulang Baterai LFP

produk. Hal ini menjelaskan bahwa daur ulang baterai LMO dan LFP ini lebih sensitif terhadap perubahan harga produk atau harga logam tembaga dan besi dibandingkan dengan perubahan harga *reagen* dan OPEX. Hasil ini bisa dijadikan acuan kepada investor untuk senantiasa melihat harga logam di pasar dunia dalam memitigasi perubahan harga tersebut.

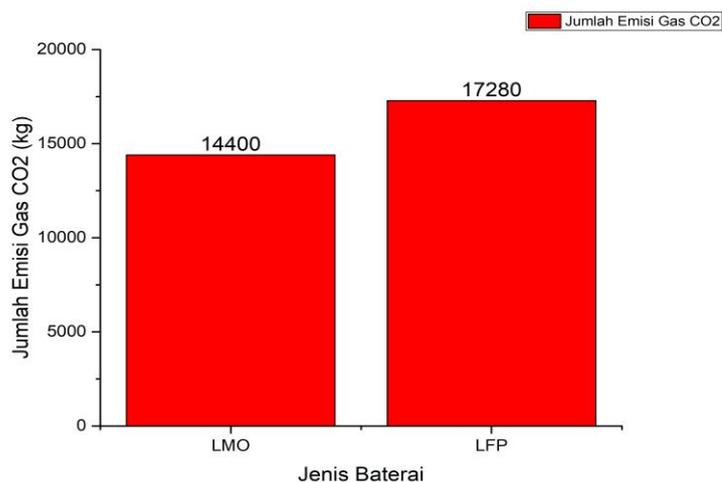
3.6. Analisis Dampak Lingkungan (*Environmental Print*) Proses Pirometalurgi Skala Pilot/Komersial untuk *Recycling* Baterai LMO dan LFP

Pada proses pirometalurgi daur ulang baterai LMO menghasilkan berbagai produk sampingan dan emisi yang berdampak pada lingkungan. Emisi terbesar yang dihasilkan berada di tahapan peleburan, sebagai efek samping dari berbagai reaksi kimia baterai yang mengandung beberapa macam bahan kimia yang mudah menguap pada temperatur tinggi, sehingga dihasilkan gas yang dapat berdampak negatif pada kesehatan dan lingkungan sekitar. Rincian emisi meliputi kategori berikut: *volatile organic compound* (VOC), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), *particulate matter* berukuran $d \leq 10\mu\text{m}$ (PM₁₀), *particulate matter* berukuran $d \leq 2.5\mu\text{m}$ (PM_{2.5}), *black carbon* (BC), dan karbon organik (OC). Selain itu, proses ini juga

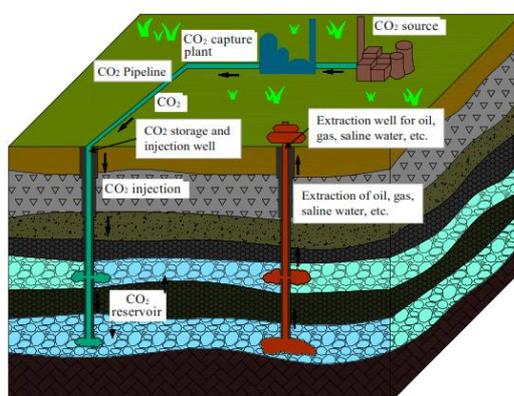
menghasilkan gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan *nitrous oxide* (N₂O). (Samarukha, 2020)

Untuk mengatasi dampak emisi ini, diperlukan peralatan yang dapat mengolah gas buang dari peleburan baterai LFP dan LMO. Salah satu langkah yang sudah diterapkan pada studi ini adalah dengan peralatan *wet scrubber* yang sudah masuk ke dalam perhitungan CAPEX dan OPEX (dalam konsumsi daya listrik). *Wet scrubber* merupakan sebuah sistem peralatan filtrasi yang memanfaatkan media air atau cairan lainnya untuk menghilangkan dan menangkap emisi yang dihasilkan. Cara kerja alat ini sederhana, yakni dengan menyimpan air atau cairan di suatu wadah, kemudian emisi hasil peleburan diarahkan untuk melewati wadah air ini. Air atau cairan lainnya memiliki sifat yang baik dalam menyerap emisi, kemudian gas yang sudah bersih keluar dari *scrubber* (Duell & Klosterman, 2018). Alat ini efektif dalam menyerap berbagai emisi yang dihasilkan peleburan daur ulang baterai, namun belum sepenuhnya menghilangkan emisi gas CO₂, sehingga diperlukan pengembangan teknologi yang juga menangkap gas CO₂ dengan efektif dan efisien.

Berdasarkan penelitian oleh Samarukha, diketahui bahwa emisi gas terbesar pada proses pirometalurgi daur ulang baterai LMO dan LFP berupa



Gambar 5. Emisi Gas CO₂ dari Daur Ulang Baterai LMO dan LFP Secara Pirometalurgi



Gambar 6. Skema Penangkapan dan Penyimpanan Gas Emisi CO₂ (Li et al., 2019)

gas karbon dioksida (CO₂) (Samarukha, 2020). Adapun jumlah emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari siklus produksi per tahunnya pada penelitian ini (dengan kapasitas *input* produksi sebanyak 8.000 ton sel baterai/tahun) untuk proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi disajikan dalam **Gambar 5**. Ditinjau dari grafik yang disajikan dalam **Gambar 5**, diketahui bahwa jumlah emisi gas CO₂ untuk proses daur ulang baterai LFP (17.280 kg CO₂/tahun) menunjukkan angka yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai LMO (14.400 kg CO₂/tahun). Hal ini dapat didefinisikan bahwa proses daur ulang baterai LMO lebih baik daripada baterai LFP dikarenakan menghasilkan emisi gas yang lebih sedikit, sehingga pencemaran lingkungan yang dihasilkan lebih minim (Samarukha, 2020).

Selain *wet scrubber*, bentuk antisipasi lainnya dalam mengurangi emisi gas buang CO₂ yang dihasilkan dari proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi adalah dengan teknologi *Carbon Capture and Storage (CCS)* dan *Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)* dapat menjadi salah satu terobosan inovasi yang dapat dikembangkan. Teknologi CCS berfokus pada tiga bidang teknis, yaitu penangkapan gas CO₂, transportasi, dan penyimpanan secara geologis. Sedangkan teknologi CCUS telah dilengkapi dengan implementasi pemanfaatan gas CO₂ sebelum penyimpanan permanen, sehingga teknologi CCUS memiliki sistem yang lebih berkembang dan terintegrasi, yang terdiri dari tiga bagian, yaitu

penangkapan gas CO₂, pemanfaatan (utilisasi), dan penyimpanan (Deng et al., 2022) (Li et al., 2019). Dalam sistem teknologi CCS dan CCUS, terdapat 3 metode utama yang diterapkan dalam penangkapan CO₂, yaitu: 1) *oxygen-enriched combustion capture*; 2) *post-combustion capture*; dan 3) *pre-combustion capture*. Metode *oxygen-enriched combustion capture* dilakukan pada proses pembakaran bahan bakar yang memiliki konsentrasi oksigen yang lebih tinggi dibandingkan udara, yang diikuti oleh sirkulasi *flue gas*, yaitu menghasilkan *flue gas* (terdiri dari air dan gas CO₂), yang kemudian diproses pada sistem pendingin untuk memperoleh konsentrasi CO₂ yang tinggi. Metode *pre-combustion capture* merupakan gabungan dari proses *integrated gasification combined cycle (IGCC)* dan memiliki kemampuan untuk menangkap ±91,6% dari gas emisi CO₂ yang dihasilkan. Metode *post-combustion capture* merupakan metode yang paling banyak digunakan dikarenakan hasil dari gas buang sudah dalam bentuk CO₂ dan air (H₂O), sehingga tidak memerlukan proses pemisahan CO₂ kembali. Disamping itu, metode *post-combustion capture* mampu menangkap ± 92,6% dari gas emisi CO₂ yang dihasilkan (Deng et al., 2022); (Susanti, 2019). Adapun skema proses penangkapan dan penyimpanan gas emisi CO₂ yang dapat diterapkan di dalam sistem proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi ini ditunjukkan pada **Gambar 6**.

4. Kesimpulan

Komponen perhitungan CAPEX meliputi biaya modal tetap, yang terdiri dari biaya langsung (peralatan, bangunan dan pendukungnya, fasilitas jasa, lahan) dan biaya tidak langsung (supervisi pembangunan, biaya konstruksi dan kontraktor, dan kontingensi), serta modal kerja, sehingga didapatkan total modal investasi dari proyek yang akan dijalankan. Total CAPEX yang diperoleh untuk proyek *pilot plant* daur ulang baterai LMO dan LFP, yakni sebesar Rp 315.665.814.400,- karena menggunakan peralatan yang sama untuk proses pirometalurgi. Daur ulang baterai LMO berpotensi mendapatkan *revenue* sebesar Rp 97.681.723.200,-/tahun dan biaya operasional sebesar Rp 27.344.200.000,-/tahun. Di sisi lain, daur ulang baterai LFP juga diperoleh *revenue* sebesar Rp 93.927.265.632,-/tahun dan biaya operasional sebesar Rp 27.331.985.600,-/tahun. Berdasarkan perhitungan tersebut, maka dapat diketahui bahwa proses daur ulang baterai LMO memiliki keuntungan yang lebih besar dibandingkan baterai LFP. Di samping itu, untuk kebutuhan biaya operasional antara kedua baterai, diketahui tidak terlalu jauh berbeda. Faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan analisis biaya pada kedua jenis baterai ini, diantaranya adalah dari segi komposisi kimia baterai, LMO memiliki kandungan tembaga lebih banyak dibandingkan LFP dan juga jumlah kebutuhan operasional yang berbeda pula.

Disamping meninjau dari analisis yang diperoleh dari perhitungan estimasi *revenue*, CAPEX, dan OPEX, perlu ditinjau pula dari indikator finansial dengan analisis IRR, NPV, PBP, PI, serta analisis sensitivitas, dimana komponen-komponen tersebut menjadi kunci bagi para investor dalam menanamkan modalnya untuk membangun proyek *pilot plant* daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi ini. Berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh, didapatkan data: 1) nilai IRR baterai LMO lebih besar dibandingkan baterai LFP dan juga nilai IRR > MARR, sedangkan pada baterai LFP, nilai IRR < MARR; 2) nilai NPV pada baterai LMO bernilai positif, sehingga dapat diartikan pada tahun ke-10, investor mengalami keuntungan, dibandingkan dengan NPV baterai LFP yang masih negatif; 3) waktu untuk modal kembali (PBP) pada baterai LMO lebih singkat, yakni 5,85 tahun atau sekitar 5 tahun 10 bulan dibandingkan dengan baterai LFP yang perlu waktu 6,23 tahun atau sekitar 6 tahun 2 bulan; 4) indeks PI keduanya di atas 1 menunjukkan keduanya layak untuk diinvestasikan. Dari seluruh analisis, dapat disimpulkan bahwa daur ulang baterai LMO lebih menjanjikan dibandingkan daur ulang baterai LFP, dikarenakan nilai IRR proyek *pilot plant* daur ulang baterai LMO lebih besar dari daur ulang baterai LFP, mengindikasikan adanya keuntungan yang diperoleh pada tahun ke-10, dan memiliki periode waktu untuk modal kembali yang lebih singkat.

Dari segi analisis sensitivitas, diperoleh kesimpulan bahwa perubahan harga produk atau harga logam yang dijual lebih berpengaruh terhadap perubahan IRR, dibandingkan perubahan harga *reagen* dan OPEX. Berdasarkan grafik yang diperoleh, perubahan harga *reagen* dan nilai OPEX cenderung lebih landai dibandingkan perubahan harga produk.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi ini lebih sensitif terhadap perubahan harga produk atau harga logam tembaga dan besi dibandingkan dengan perubahan harga *reagen* dan nilai OPEX.

Rincian gas emisi yang merupakan dampak lingkungan dari proses pirometalurgi daur ulang baterai LMO dan LFP, meliputi *volatile organic compound* (VOC), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), *particulate matter* berukuran $d \leq 10\mu\text{m}$ (PM₁₀), *particulate matter* berukuran $d \leq 2.5\mu\text{m}$ (PM_{2.5}), *black carbon* (BC), dan karbon organik (OC). Selain itu, proses ini juga menghasilkan gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), and *nitrous oxide* (N₂O). Akan tetapi, dari proses daur ulang baterai LMO dan LFP secara pirometalurgi, gas CO₂ menjadi penyumbang emisi terbesar dari total keseluruhan gas emisi yang dihasilkan. Adapun rincian besaran emisi gas CO₂ yang dihasilkan untuk proses daur ulang dari kedua jenis baterai tersebut adalah 14.400 kg CO₂/tahun (untuk baterai LMO) dan 17.280 kg CO₂/tahun (untuk baterai LFP). Hal ini menunjukkan bahwa proses daur ulang baterai LMO lebih baik daripada baterai LFP dikarenakan menghasilkan emisi gas yang lebih sedikit, sehingga pencemaran lingkungan yang dihasilkan lebih minim. Opsi teknologi yang dapat diterapkan untuk meminimalisir emisi gas yang dihasilkan dari operasional daur ulang kedua baterai tersebut adalah instalasi peralatan *wet scrubber* dan implementasi sistem CCS/CCUS.

Saran

Dalam penulisan jurnal berikutnya, sebaiknya juga dilakukan kajian mengenai beberapa jenis baterai lithium lainnya, agar dapat dilakukan perbandingan perhitungan tekno-ekonomi yang paling optimum. Perbandingan terhadap beberapa proses juga dapat dilakukan, agar dapat diketahui biaya operasional, modal, peluang investasi, dan estimasi keuntungan yang paling efisien dalam membangun *pilot plant* untuk proses daur ulang baterai serta menghitung penerapan CCS/CCUS.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh jajaran pegawai unit kerja Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Mineral – BPPT (kini Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN), Direktorat Kebijakan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran – Deputi Bidang Kebijakan Pembangunan BRIN, dan pihak lainnya yang telah terlibat dan membantu dalam proses kajian perhitungan tekno-ekonomi untuk proses daur ulang baterai ini.

5. Daftar Pustaka

- Ailima. (2022). Internal Rate of Return (IRR) - AILIMA. <https://ailima.co.id/internal-rate-of-return-irr/>
- Aprilian, Y. (2019). *Pengertian CAPEX dan OPEX Beserta Contohnya* - *Lamnesia Media* (p. 1).

- <https://lamnesia.com/pengertian-CAPEX-dan-OPEX/>
- Argonne National Laboratory. (2019). "EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model." Chicago
- ATIC. (2018). The Lithium-Ion Battery Value Chain – New Economy Opportunities for Australia. *Australian Trade and Investment Commission*, 56.
- Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., & Mierlo, J. Van. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/en10091314>
- Big Brothers. (2021). Daftar Risk Premium Berdasarkan Negara. Bigbrothersinvestment . <http://www.bigbrothersinvestment.com/detailpost/daftar-risk-premium-berdasarkan-negara>
- Buchmann, I. (2019). BU-205: Types of Lithium-ions - Battery University. In *Battery University* (pp. 1–16). <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- Chen, J. (2023). Profitability Index (PI): Definition, Components, and Formula. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/p/profitability.asp>
- Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., & Wang, M. (2019). EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. *Argonne National Laboratory*, 1–88.
- Dananjaya, D. (2021). Pabrik Baterai Mobil Listrik sampai Daur Ulang Mulai Aktif 2023. KOMPAS.com. <https://otomotif.kompas.com/read/2021/06/25/072200415/pabrik-baterai-mobil-listrik-sampai-daur-ulang-mulai-aktif-2023>
- Deng, Q., Ling, X., Zhang, K., Tan, L., Qi, G., & Zhang, J. (2022). *CCS and CCUS Technologies : Giving the Oil and Gas Industry a Green Future*. 10(June 2021), 2020–2023. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.919330>
- Dinas Kominfo Jateng. (2022). Ganjar umumkan penetapan UMK Jawa Tengah, Kota Semarang Tertinggi. In 7 Desember. <https://jatengprov.go.id/publik/ganjar-umumkan-penetapan-umk-jawa-tengah-kota-semarang>
- Duall, H., & Klosterman, F. (2018). What Is A Wet Scrubber? CECO Environmental. <https://www.cecoenviro.com/blog/what-is-a-wet-scrubber/>
- Duttgupta, Subhasri & Mansharamani, Rajesh. (2011). Extrapolation tool for load testing results.
- Fatimah, S. B., PR, A. P., Siahaan, T., & Khaerudin, K. (2020). Analysis of Technology and Policy Application for Recycling Lithium-ion Batteries To Support National Defense .<http://seminar.uad.ac.id/index.php/STEEEM/article/view/3227>
- Foster, M., Isely, P., Standridge, C. R., & Hasan, M. M. (2014). Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(3), 698–715. <https://doi.org/10.3926/jiem.939>
- Frey, P. A., & Reed, G. H. (2012). The Ubiquity of Iron. *ACS Chemical Biology*, 7(9), 1477–1481. <https://doi.org/10.1021/cb300323q>
- Globalsources. (2021). <https://www.globalsources.com/Wheel-loader/Wheel-Loader-FL976H-7-Ton-1186900608p.htm>
- IEA, (2022), Global EV Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- IPCC, (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.
- Kaya, M. (2022). State-of-the-art lithium-ion battery recycling technologies. *Circular Economy*, 1(2), 100015. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2022.100015>
- KIK (Kawasan Industri Kendal). (2020). Mengapa KIK. <https://kendalindustrialpark.co.id/page/index/17/why-kip>.
- Kompas.com. (2021). *Rincian UMR Karawang, Bekasi, dan Purwakarta di 2021*. <https://money.kompas.com/read/2021/06/21/224600026/rincian-umr-karawang-bekasi-dan-purwakarta-di-2021>
- Makuza, B., Tian, Q., Guo, X., Chattopadhyay, K., & Yu, D. (2021, April). Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, 491, 229622. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229622>
- Matche. (2014). <https://www.matche.com/equipcost/EquipmentIndex.html>
- Mercer Capital.(2021)Understand the Discount Rate Used in a Business Valuation. (2021).<https://mercercapital.com/article/understand-the-discount-rate-used-in-a-business-valuation/>
- Mular A.L. (1998). "CAPCOSTS: A Handbook for Estimating Mining and Mineral Processing Equipment Costs and Capital Expenditures and Aiding Mineral Project Evaluations". Vol.

- 47,1998; Canadian Institute of Mining, Montreal, Canada
- Muzayanha, S. U., Yudha, C. S., Hasanah, L. M., Nur, A., & Purwanto, A. (2019, August 31). Effect of Heating on the Pretreatment Process for Recycling Li-Ion Battery Cathode. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 4(2), 105. <https://doi.org/10.20961/jkpk.v4i2.29906>
- NWANEKEZIE, O. F., IROEGBU, A. N., WOGU, C. L., & OKOROCHA, K. A. (n.d.). Sensitivity Analysis: A Technique for Investigating the Impact of Changes in Project Variables. *International Journal of Research Development*.
- Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J., Heidrich, O., Kendrick, E., Edge, J. S., & Offer, G. (2021, July). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *IScience*, 24(7), 102787. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>
- Li, J., Hou, Y., Wang, P., & Yang, B. (2019). *A Review of Carbon Capture and Storage Project Investment and Operational Decision-Making Based on Bibliometrics*. <https://doi.org/10.3390/en12010023>
- Liu, S., Wang, B., Zhang, X., Zhao, S., Zhang, Z., & Yu, H. (2021). Reviving the lithium-manganese-based layered oxide cathodes for lithium-ion batteries. *Matter*, 4(5), 1511–1527. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.02.023>
- Liu, Y., Zhang, R., Wang, J., & Wang, Y. (2021). Current and future lithium-ion battery manufacturing. *IScience*, 24(4), 102332. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332>
- Paddle. (2022). Discount rate formula: Calculating discount rate [WACC/APV] <https://www.paddle.com/resources/discount-rate-formula>
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill Education.
- Purnatiyo, D. (2013). Analisis Kelayakan Investasi Alat DNA Real Time Thermal Cycler (RT-PCR) Untuk Pengujian Gelatin. *Jurnal PASTI*, Volume VIII No 2, 212 – 226.
- Perusahaan Listrik Negara (PLN). (2021). Penetapan Tarif Tenaga Listrik
- Peraturan Bupati Kendal Nomor 90 Tahun 2008 Tentang Tarif Air Pada Perusahaan Daerah Air Minum Tirta Panguripan Kabupaten Kendal
- Rizaty, M. A. (2022). Motor Listrik di Indonesia Diproyeksi Mencapai 13 Juta pada 2030. [Dataindonesia.id](https://dataindonesia.id). <https://dataindonesia.id/sektor-riil/detail/motor-listrik-di-indonesia-diproyeksi-mencapai-13-juta-pada-2030>
- Rizeki, D. N. (2023). IRR adalah: Pengertian, Rumus, dan Cara Menghitungnya. [Majoo.id](https://majoo.id/solusi/detail/irr-adalah). <https://majoo.id/solusi/detail/irr-adalah>
- Ross S. (2021). *CAPEX vs. OPEX: What's the Difference?* *Investopedia*. <https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-CAPEX-and-operational-expenditures-OPEX.asp>
- Samarukha, I. (2020). *Recycling strategies for End-of-Life Li-ion Batteries from Heavy Electric Vehicles*. 1–52.
- Suryohendrasworo, S. D. (2021, December 30). Penyisihan Kontaminan dari Air Limbah Hasil Daur Ulang Baterai LiFePO4 (LFP) Menggunakan Penukar Ion Resin Kation Amberlite HPR1100 Na dan Resin Anion Dowex Marathon A. *Jurnal Rekayasa Proses*, 15(2), 231. <https://doi.org/10.22146/jrekpro.69847>
- Susanti, I. (2019). *Technologies and Materials for Carbon Dioxide Capture*. 1(2).
- Syazili, A., Kurniawan, A., Widada, J., & Sembada, P. T. S. (2021, February 1). Techno-economic Analysis in the Development of Smart Sluice Gate Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 662(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/662/1/012005>
- Thompson, D., Hyde, C., Hartley, J. M., Abbott, A. P., Anderson, P. A., & Harper, G. D. (2021, December). To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105741>
- World Resources Institute (WRI). 2022. *Climate Watch Historical GHG Emissions*. Washington, DC. Available online at: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- Yang, Y.; Lan, L.; Hao, Z.; Zhao, J.; Luo, G.; Fu, P.; Chen, Y. (2022). Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China. *Energies* 2022, 15, 5321. <https://doi.org/10.3390/en15155321>
- Yuan, C., Deng, Y., Li, T., & Yang, F. (2017). Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 53–56. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.109>