

PENGEMBANGAN MODEL MANAJEMEN RANTAI PASOK BERKELANJUTAN DENGAN IMPLEMENTASI KONSEP EKONOMI SIRKULAR PADA BATERAI KENDARAAN LISTRIK

1st Lisa Eka Pramudita
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
lisaekapramudita@student.telkomuniv
ersity.ac.id

2nd Silvi Istiqomah
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
Silviistiqomah@telkomuniversity.ac.id

3rd Rahaditya Dimas Prihadianto
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
rdprihadian@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Inovasi teknologi kendaraan listrik dapat memberikan solusi sarana transportasi yang ramah lingkungan dan hemat energi. Namun terdapat permasalahan, yaitu baterai yang memiliki masa hidup yang terbatas. Oleh karena itu, peneliti membuat model *Multi-Level Perspective (MLP)* kendaraan listrik. Model tersebut memungkinkan peneliti untuk menganalisis interaksi antara berbagai tingkatan, yaitu lanskap sosio-teknis di tingkat makro, rezim sosio-teknis di tingkat meso, dan inovasi khusus di tingkat mikro yang akan digunakan untuk menganalisis transisi keberlanjutan. Selain itu, dibuat model siklus hidup baterai kendaraan listrik untuk merencanakan ekonomi sirkular pada kendaraan listrik. Pada siklus hidup baterai, baterai yang telah habis masa pakainya harus melalui proses *reuse*, remanufaktur, dan *recycle* terlebih dahulu sebelum benar-benar dibuang. Dengan dibuatnya model rantai pasok dengan implementasi ekonomi sirkular diharapkan dapat membantu mewujudkan penggunaan energi yang lebih terbaharukan, dapat mengurangi penumpukan sampah baterai kendaraan listrik, dan dapat memaksimalkan nilai dari material yang didaur ulang serta memastikan kinerja yang optimal dalam rantai pasokan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk merencanakan kedepannya terkait dengan pengelolaan limbah baterai.

Kata kunci— Ekonomi sirkular, Kendaraan Listrik, Perspektif Multi Level (MLP)

I. PENDAHULUAN

Peningkatan penggunaan kendaraan bermotor di Indonesia telah mengakibatkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, terutama bensin, dengan total kepemilikan mencapai 158.698.240 unit, di mana sepeda motor merupakan jenis kendaraan yang paling dominan dengan 132.522.215 unit [1]. Kenaikan jumlah kendaraan ini memicu

kekhawatiran akan kelangkaan bahan bakar fosil [2]. Untuk mengatasi masalah ini, pemerintah berencana mengkomersialkan kendaraan listrik sebagai solusi ramah lingkungan dan hemat biaya operasional. Kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai sumber energi utama yang bisa diisi ulang, menawarkan siklus hidup energi yang lebih berkelanjutan dan mengurangi emisi dibandingkan dengan bahan bakar fosil [3].

Namun, baterai kendaraan listrik memiliki masa pakai terbatas dan dapat meningkatkan limbah baterai seiring dengan meningkatnya produksi dan konsumsi [4]. Untuk mengatasi masalah ini, penerapan konsep ekonomi sirkular pada baterai menjadi penting. Konsep ekonomi sirkular berfokus pada pengurangan pemborosan melalui daur ulang dan pemulihan, bertujuan memperpanjang siklus hidup produk dan mengurangi dampak lingkungan [5]. *Closed Loop Supply Chain (CLSC)* memainkan peran kunci dalam mendukung konsep ini dengan mengintegrasikan daur ulang dan pemulihan material ke dalam seluruh siklus hidup produk [6].

Sistem *reverse logistics* sangat penting untuk keberhasilan CLSC, memungkinkan pengembalian baterai ke produsen untuk didaur ulang dan digunakan kembali [7]. Pendekatan ini membantu mengelola stok, penanganan produk bekas, dan mengurangi pemborosan dengan memanfaatkan kembali sampah baterai sebagai sumber daya. Dengan memaksimalkan nilai material yang didaur ulang, sistem ini berkontribusi pada efisiensi sumber daya dalam rantai pasokan [8].

Beberapa studi telah mengeksplorasi implementasi ekonomi sirkular dalam berbagai konteks. Misalnya, teknologi *blockchain* digunakan untuk meningkatkan transparansi dalam rantai pasokan baterai kendaraan listrik [8] dan model sirkular berusaha mengurangi pemborosan sumber daya global [9]. Selain itu, model e-bisnis ekonomi sirkular berbasis fitur telah diusulkan untuk meningkatkan kinerja lingkungan dan keberlanjutan [10]. Penelitian ini akan mengembangkan model manajemen rantai pasok

dengan penerapan ekonomi sirkular pada kendaraan listrik menggunakan metode *Multi-Level Perspective (MLP)*, diharapkan dapat mengurangi limbah baterai dan meningkatkan nilai material yang didaur ulang [11]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk Merancang model siklus hidup baterai *Nickel manganese cobalt (NMC)* pada kendaraan listrik serta merancang model manajemen rantai pasok dengan implementasi ekonomi sirkular pada baterai kendaraan listrik menggunakan pendekatan *Multi-Level Perspective (MLP)*.

II. KAJIAN TEORI

A. Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik adalah jenis kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai tenaga penggerak dan baterai sebagai penyimpanan energi listriknya yang dapat dilakukan pengisian ulang atau pelepasan [12]. Selain manfaat lingkungan, kendaraan listrik juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan efisiensi energi, serta memberikan keuntungan ekonomi [13]. Inovasi dalam teknologi baterai, seperti baterai *Nickel manganese cobalt (NMC)*, berkontribusi pada kemajuan kendaraan listrik dengan menawarkan stabilitas energi yang baik, densitas tinggi, dan risiko yang lebih rendah dibandingkan baterai jenis lain [14].

B. Ekonomi Sirkular

Menurut Elyzabeth Eka Nurmelasari dan Wahyu Fahrul Ridho, adalah konsep yang berfokus pada pemaksimalan nilai penggunaan suatu barang dan komponennya secara berulang, mengutamakan efisiensi sumber daya [15]. Kirzherr et al. menggambarkan ekonomi sirkular sebagai sistem yang menggabungkan kegiatan mengurangi, menggunakan kembali, dan mendaur ulang, yang memerlukan perubahan sistematis untuk meningkatkan nilai ekonomi, kualitas lingkungan, dan keadilan sosial, dengan melibatkan peran penting dari model bisnis dan konsumen [16]. Bappenas menjelaskan bahwa model ini bertujuan untuk memperpanjang siklus hidup produk dan sumber daya agar dapat digunakan selama mungkin, berfokus pada pengurangan kerusakan sosial dan lingkungan yang timbul dari model ekonomi linear tradisional [17]. Dengan demikian, ekonomi sirkular bertujuan untuk mempertahankan nilai produk dan sumber daya dalam perekonomian untuk mencapai pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat [17].

C. *Closed-Loop Supply Chain Management (CLSCM)*

Closed-Loop Supply Chain Management (CLSCM) adalah pendekatan strategis yang mengelola siklus hidup produk secara menyeluruh, termasuk proses daur ulang dan penggunaan kembali produk, untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan keuntungan [18]. CLSCM melibatkan kolaborasi antara produsen, distributor, dan konsumen untuk menciptakan siklus hidup produk yang lebih berkelanjutan dengan mengintegrasikan pengembalian produk bekas ke dalam rantai pasok untuk didaur ulang atau digunakan kembali, mengurangi dampak lingkungan, dan membuka peluang baru untuk efisiensi operasional serta nilai ekonomi

[19]. Prinsip utama CLSCM meliputi pemahaman siklus hidup produk, desain produk yang mudah didaur ulang, pengelolaan logistik berkelanjutan, dan penggunaan kembali produk bekas, yang membantu mengurangi limbah dan memaksimalkan nilai produk sepanjang siklus hidupnya [20]. Implementasi CLSCM menawarkan manfaat seperti pengurangan limbah, efisiensi penggunaan sumber daya, dan peningkatan citra perusahaan terkait keberlanjutan, meskipun menghadapi tantangan seperti kompleksitas manajemen logistik dan kebutuhan akan teknologi pendukung [21]. Dengan dukungan penuh dari berbagai pihak dan inovasi berkelanjutan, CLSCM memiliki potensi untuk menciptakan rantai pasok yang lebih berkelanjutan dan efisien.

D. *Reverse Logistics*

Dalam manajemen rantai pasokan, *reverse logistics* merujuk pada proses pergerakan produk dari konsumen kembali ke produsen untuk pengelolaan lebih lanjut, yang meliputi pengumpulan, transportasi, pemulihan, dan daur ulang barang bekas atau limbah [22]. Tujuan utama *reverse logistics* adalah untuk mengelola barang yang dikembalikan, retur, atau limbah dengan cara yang efisien dan berkelanjutan. Proses ini dimulai dengan identifikasi barang yang dikembalikan untuk menentukan apakah barang tersebut dapat dijual kembali, diperbaiki, atau didaur ulang. Barang kemudian dikirim dari konsumen ke fasilitas pengelolaan di mana mereka mungkin menjalani perbaikan, perubahan, atau daur ulang sebelum dipasarkan kembali atau digunakan lagi [23]. Aktivitas utama dalam *reverse logistics* mencakup pengumpulan barang dari pelanggan, inspeksi produk, dan pengangkutan kembali ke fasilitas pemulihan untuk manufaktur ulang, daur ulang, perbaikan, atau penggunaan kembali, seperti yang ditunjukkan pada gambar konsep dasar *reverse logistics* [24].

E. *Metode Multi-Level Perspective (MLP)*

Metode Multi-Level Perspective (MLP) adalah pendekatan analisis kualitatif yang dirancang untuk memahami perubahan dalam konteks sistem yang lebih luas, dengan fokus pada interaksi antara berbagai tingkatan, seperti individu, organisasi, dan masyarakat [25]. MLP memandang transisi sebagai hasil dari dinamika dan interaksi antara level yang berbeda, memfasilitasi pemahaman tentang bagaimana perubahan sosial, teknologi, dan kebijakan dapat terjadi secara bersamaan. Dalam penelitian menggunakan MLP, peneliti mengumpulkan data secara mendalam dan sistematis untuk menganalisis bagaimana interaksi antara berbagai tingkatan mempengaruhi transisi dan perubahan sosial [26]. Pendekatan ini juga melibatkan kolaborasi dengan pemangku kepentingan untuk mengidentifikasi dan memahami faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan pada berbagai level sistem [25].

F. Peraturan Terkait

Terdapat beberapa peraturan yang telah ditetapkan landasan hukum komersialisasi kendaraan listrik di Indonesia. Peraturan tersebut adalah:

- a. Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019
Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019 berisi mengenai ketentuan-ketentuan yang mengatur penggunaan kendaraan bermotor listrik berbasis baterai di Indonesia, serta mengatur prosedur pendaftaran, pengujian, dan

registrasi kendaraan listrik. Peraturan tersebut juga dikeluarkan oleh Presiden dalam upaya untuk mempercepat program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*battery electric vehicle*) untuk transportasi jalan [27].

- b. Peraturan Menteri No. 27 Tahun 2020
Peraturan Menteri No. 27 Tahun 2020 yang berisi mengenai penetapan harga patokan dalam perhitungan tarif tenaga listrik yang disediakan oleh perusahaan listrik negara (PLN). Peraturan ini merupakan regulasi yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) untuk mendorong pengembangan energi terbarukan [28].
- c. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) No. 12 Tahun 2021
Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) No. 12 Tahun 2021 yang berisi mengenai baku mutu emisi daur ulang baterai *lithium*. Peraturan ini menetapkan standar baku mutu emisi yang harus dipatuhi oleh pabrik-pabrik atau fasilitas daur ulang baterai *lithium*. Standar baku mutu ini mencakup parameter-parameter kualitas udara seperti konsentrasi gas-gas beracun yang dapat dihasilkan selama proses daur ulang baterai, seperti sulfur dioksida, nitrogen dioksida, dan partikel-partikel berbahaya lainnya. Dengan menetapkan standar baku mutu yang ketat, Permen LHK ini bertujuan untuk melindungi kualitas udara sekitar fasilitas daur ulang baterai dan mencegah dampak negatifnya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia [28].

III. METODE

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan sistematis yang melibatkan beberapa tahapan penting dalam analisis dan *pengembangan* model manajemen rantai pasok untuk baterai kendaraan listrik dengan penerapan konsep ekonomi sirkular. Proses penelitian dimulai dengan studi pustaka dan studi lapangan untuk mengumpulkan informasi mendalam mengenai topik penelitian. Studi pustaka melibatkan penelusuran literatur terkait konsep ekonomi sirkular dan manajemen rantai pasok, sementara studi lapangan dilakukan melalui wawancara dan observasi untuk mendapatkan data primer serta informasi langsung dari pemangku kepentingan dan situasi di lapangan. Setelah itu, identifikasi masalah dilakukan untuk merumuskan permasalahan utama terkait penumpukan limbah baterai dan solusi yang mungkin diterapkan.

Selanjutnya, data yang dikumpulkan akan dianalisis menggunakan metode *Multi-Level Perspective (MLP)* untuk memahami interaksi antara berbagai tingkat sistem dalam konteks transisi keberlanjutan kendaraan listrik. Pembuatan model dilakukan dengan merancang siklus hidup baterai kendaraan listrik, model rantai pasok konvensional, dan model rantai pasok berbasis ekonomi sirkular. Model-model ini kemudian akan dianalisis untuk membandingkan perbedaan antara rezim lama dan baru. Tahapan verifikasi dan validasi melibatkan pemeriksaan model dengan pemangku kepentingan untuk memastikan kesesuaian dan akurasi. Akhirnya, hasil analisis akan dievaluasi untuk menarik kesimpulan dan memberikan saran perbaikan, serta rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Daftar Pemangku Kepentingan (*Stakeholder*)

Peneliti memulai pengumpulan data dengan mengimplementasikan serangkaian metode pengumpulan informasi langsung (data primer) dan informasi yang sudah ada sebelumnya (data sekunder). Pengumpulan data langsung dilakukan peneliti dengan melakukan wawancara kepada lima orang pemangku kepentingan. Pemangku kepentingan tersebut dipilih untuk mewakili seluruh pemangku kepentingan yang terlibat dalam penelitian ini. Kelima pemangku kepentingan tersebut akan mewakili dari pemasok hingga proses akhir dari pengelolaan limbah baterai kendaraan listrik. Wawancara dilakukan untuk mengumpulkan wawasan dari pendapat ahli mengenai manfaat apa saja yang bisa didapatkan dari pengelolaan daur ulang baterai serta penerapan ekonomi sirkular pada kendaraan listrik. Berikut adalah daftar pemangku kepentingan (*stakeholder*) yang akan dijelaskan pada **tabel 1**. Untuk menjaga kerahasiaan setiap pemangku kepentingan, nama perusahaan akan dicantumkan sebagai "Pemangku Kepentingan-X" dan nama peserta dianonimkan.

Tabel 1. Daftar Pemangku Kepentingan dan Profil Singkat Perusahaannya

Kode	Profil Singkat Stakeholder	Keterangan
Pemangku Kepentingan 1	Pemangku Kepentingan 1 merupakan CEO perusahaan yang menyediakan baterai <i>lithium</i> dan turunannya. Selain itu perusahaan ini juga menerapkan proses produksi yang ramah lingkungan.	Tugas dari Pemangku Kepentingan 1 adalah membuat keputusan penting dan mengelola secara keseluruhan sumber daya perusahaan dan produksi baterai <i>lithium</i>
Pemangku Kepentingan 2	Pemangku Kepentingan 2 merupakan seorang CMO (<i>Chief Marketing Officer</i>) dari <i>supplier</i> bahan baku baterai di Indonesia.	Pemangku Kepentingan 2 merupakan <i>supplier</i> bahan baku baterai yang bertugas menyediakan dan memasok bahan baku berkualitas yang dibutuhkan untuk penelitian dan pengembangan pada perusahaan, memastikan ketersediaan bahan baku sesuai spesifikasi, dan memastikan pengiriman tepat waktu untuk

Kode	Profil Singkat Stakeholder	Keterangan
		mendukung kelancaran operasional penelitian dan produksi baterai.
Pemangku Kepentingan 3	Pemangku Kepentingan 3 merupakan profesor disalah satu universitas di Indonesia.	Pemangku Kepentingan 3 berperan sebagai <i>expert</i> yang bertugas memberikan saran dan panduan teknis terkait dengan teknologi baterai kepada peneliti dan berperan dalam menjembatani komunikasi antara peneliti dengan pemangku kepentingan lainnya.
Pemangku Kepentingan 4 Dan 5	Pemangku Kepentingan 4 terdiri dari dua orang <i>researcher</i>	Pemangku Kepentingan 4 berperan memverifikasi pengetahuan yang sudah ada atau mengembangkan teori dan solusi untuk berbagai penelitian yang sedang dilakukan.

B. Baterai pada Kendaraan Listrik

Baterai kendaraan listrik, seperti baterai NMC, memainkan peran krusial dalam menyediakan daya untuk motor listrik dan menjadi komponen utama dalam sistem penyimpanan energi kendaraan listrik. Meski baterai ini menawarkan kelebihan seperti kepadatan energi tinggi dan ramah lingkungan, peningkatan produksi kendaraan listrik juga menyebabkan masalah limbah baterai yang signifikan. Baterai mengandung bahan kimia berbahaya yang dapat mencemari air, tanah, dan udara jika tidak dikelola dengan benar, menimbulkan risiko pencemaran dan masalah kesehatan. Saat ini, Indonesia belum memiliki fasilitas khusus untuk pengelolaan limbah baterai, sehingga diperlukan penerapan konsep ekonomi sirkular melalui

pengembangan model siklus hidup baterai dan manajemen rantai pasok untuk menangani limbah baterai secara efektif.

C. Bill of Material (BOM) Baterai NMC

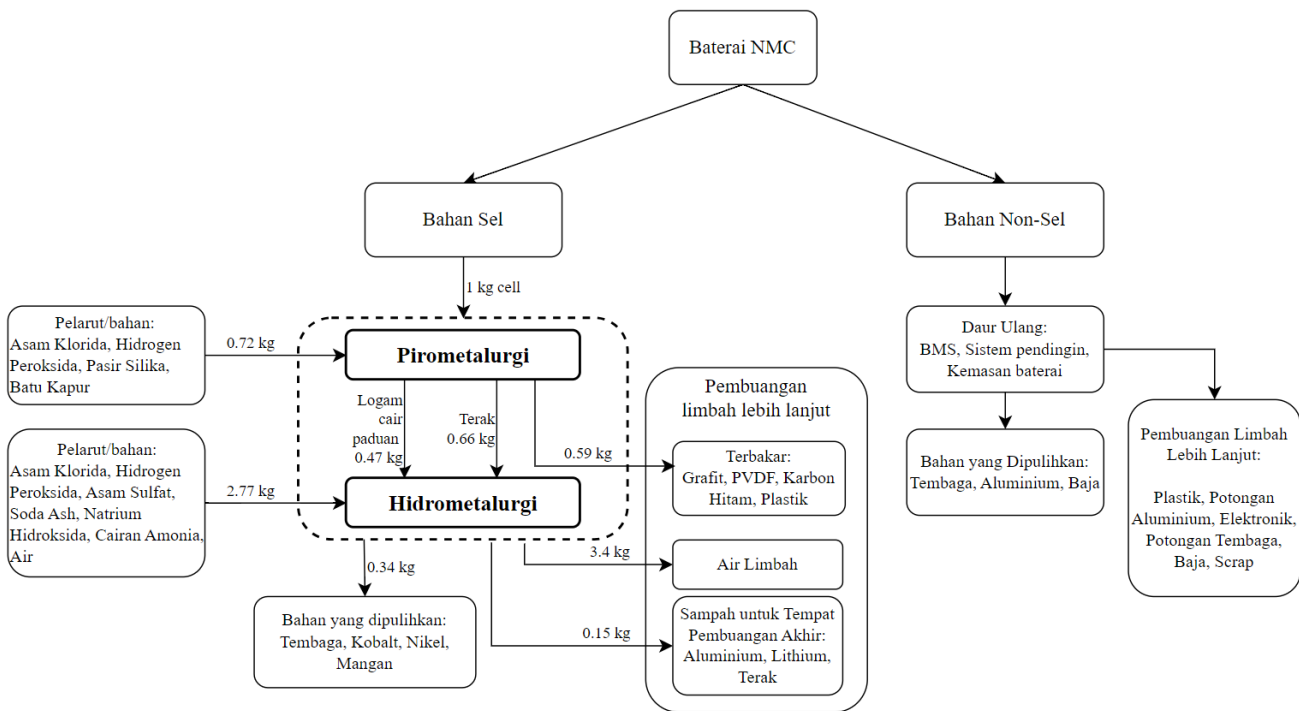
Pada proses daur ulang baterai pada kendaraan listrik penting untuk mengetahui apa saja komponen penyusun dari baterai agar proses daur ulang baterai dapat dilakukan secara maksimal. BOM dari baterai akan penulis gambarkan pada **tabel 2** dibawah ini.

Tabel 2. Bill of Material (BOM) Baterai NMC

No.	Nama Material	NMC111
Bahan Sel		kg
1	Bahan katoda aktif	0.287
2	Grafit	0.160
3	Karbon hitam	0.020
4	Pengikat (PVDF)	0.25
5	Tembaga	0.134
6	Aluminium	0.069
7	Elektrolit: Etilen karbonat	0.018
8	Elektrolit: Dimetil karbonat	0.050
9	Plastik: Polipropilena	0.012
10	Plastik: Polietilen	0.003
Bahan non-sel		
11	Tembaga	0.003
12	Aluminium	0.184
13	Baja	0.007
14	PET	0.005
15	Elektronik	0.037

Sumber : [29]

Tabel tersebut mencakup mengenai material apa saja yang dibutuhkan untuk membuat satu sel baterai. Bahan baterai NMC dibagi menjadi dua kelompok. Pertama bahan sel, mencakup bahan-bahan utama untuk membuat sel baterai dan yang kedua bahan non-sel yaitu, semua bahan yang digunakan untuk menyelesaikan paket baterai. Proses produksi katoda dari baterai NMC dimulai dengan melarutkan substrat nikel, mangan, dan kobalt yang bereaksi dengan hidroksida. Setelah substrat telah dicampur dan larut sepenuhnya, *natrium hidroksida* dan *amonium hidroksida* ditambahkan ke larutan. Kemudian reaktor dipanaskan oleh uap menjadi 50 °C dan disimpan hangat selama jangka waktu yang lama. Selanjtnya dilakukan proses penyaringan, pencucian dan pengeringan untuk menghasilkan prekursor NMC. Serbuk kering kemudian dicampur dengan *lithium carbonate* untuk menghasilkan oksida yang diinginkan. Anoda biasanya terdiri dari grafit dan pengikat PVDF. Untuk material non-sel terdiri dari aluminium, baja, PET, dan elektronik.



Gambar 1. Akhir Masa Pakai Komponen Baterai Kendaraan Listrik

Sumber : [29]

Selanjutnya material yang bisa didaur ulang akan melalui beberapa proses seperti proses *Pretreatment*, pirometalurgi dan hidrometalurgi [29]. Berikut ini adalah penjelasan mengenai proses daur ulang material baterai pada kendaraan listrik.

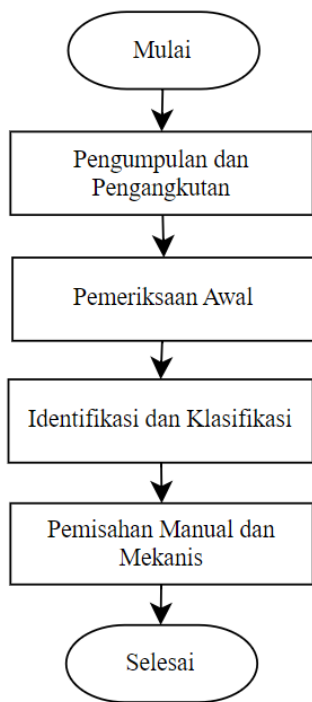
1. Pemisahan awal (*Pretreatment*) yang dimulai dengan baterai pada kendaraan listrik dimatikan dan sisa energinya dihilangkan, lalu baterai dibuka dan komponen-komponennya dipisahkan, komponen-komponen yang berbeda seperti elektroda, elektrolit, dan pembungkus logam dipisahkan.
2. Pemisahan Fisik, yaitu dengan memisahkan baterai dari bahan lain melalui cara fisik seperti penyaringan atau sentrifugasi.
3. Selanjutnya baterai diproses untuk memecahkan senyawa yang mengandung lithium menjadi elemen-elemen terpisahnya, proses ini melibatkan pemecahan senyawa yang mengandung material seperti nikel, mangan, kobalt, karbon, aluminium, dan tembaga menjadi elemen-elemen terpisahnya, yang kemudian dapat dipisahkan dan diperoleh kembali.
4. Selanjutnya dilakukan regenerasi logam, logam-logam seperti nikel, mangan, kobalt, aluminium, dan tembaga yang terkandung dalam baterai dipulihkan melalui proses pirometalurgi dan hidrometalurgi. Proses tersebut melibatkan penggunaan asam oksalat untuk memisahkan logam-logam tersebut dan menghasilkan material aktif yang dapat digunakan kembali dalam pembuatan baterai baru.
5. Terakhir dilakukan pengujian dan pemurnian, padatan yang dihasilkan dari proses daur ulang diuji menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dan XRD (*X-ray Diffraction*) untuk memastikan kualitasnya, padatan tersebut dibandingkan dengan padatan yang dihasilkan dari bahan precursor

untuk memastikan bahwa material yang diperoleh memiliki sifat yang sama dengan material asli.

D. Pengolahan Limbah Baterai Kendaraan Listrik

Pengolahan limbah baterai kendaraan listrik yang sudah habis masa pakainya memerlukan proses penyortiran secara khusus. Tahapan awal dimulai dengan proses pengumpulan baterai dari berbagai sumber, seperti pusat daur ulang, produsen baterai kendaraan listrik, konsumen dan tempat pembuangan sampah baterai. Selanjutnya dilakukan penyortiran berdasarkan jenis dan kondisi untuk memastikan penanganan yang tepat dan memaksimalkan efisiensi daur ulang. Pengelompokan penyortiran meliputi berdasarkan jenis baterai, jenis kimia, dan bentuk fisik, serta berdasarkan pada kondisi baterai [29]. Kondisi fisik baterai meliputi baterai dengan kondisi yang masih utuh dan tidak rusak dipisahkan dari baterai yang mengalami kerusakan fisik, seperti kebocoran, bengkak, atau deformasi. Selanjutnya untuk kondisi kimia baterai meliputi baterai yang masih memiliki sebagian besar kapasitas energinya dapat diperlakukan berbeda dari baterai yang sudah sangat habis atau mengalami degradasi parah.

Proses Penyortiran baterai terdiri dari beberapa proses yang akan digambarkan pada gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Proses Penyortiran Baterai

1. Pengumpulan dan pengangkutan, yaitu proses dimana baterai bekas dikumpulkan dari berbagai sumber dan diangkut ke fasilitas daur ulang yang sesuai.
2. Pemeriksaan awal, yaitu proses yang dilakukan untuk mengidentifikasi kerusakan fisik dan mengklasifikasikan baterai berdasarkan jenis dan kondisi.
3. Identifikasi dan klasifikasi, yaitu proses yang menggunakan teknologi seperti spektroskopi atau analisis *X-ray* untuk mengidentifikasi komposisi kimia dan menentukan jenis katoda yang digunakan dalam baterai.
4. Pemisahan manual dan mekanis, yaitu proses pemisahan manual dilakukan untuk memisahkan baterai berdasarkan bentuk fisik dan kondisi visual. Pemisahan

mekanis dapat melibatkan penggunaan conveyor, magnet, dan alat pemisah lainnya untuk mengelompokkan baterai lebih lanjut.

Selanjutnya dalam pengelolaan limbah baterai kendaraan listrik, pengelompokan limbah baterai pada kendaraan listrik merupakan langkah penting untuk mengetahui langkah selanjutnya yang dapat dilakukan untuk menangani limbah baterai tersebut. Setelah baterai yang habis masa pakai pertamanya lalu dikeluarkan dari kendaraan listrik, baterai tersebut memiliki tiga kemungkinan tujuan, yaitu fasilitas daur ulang, aplikasi masa pakai kedua, atau fasilitas pengelolaan limbah [31]. Baterai yang tergolong dalam kelompok fasilitas daur ulang, setelah baterai dikeluarkan dari kendaraan listrik, baterai tersebut akan diproses untuk mengekstrak material dari baterai yang masih bisa digunakan. Selanjutnya baterai yang tergolong dalam kelompok remanufaktur atau penggunaan kembali (*reuse*), baterai tersebut akan dipasok ke perusahaan perbaikan baterai. Seperti yang dikatakan oleh Pemangku Kepentingan 1, perusahaan akan memproses baterai agar cocok untuk aplikasi masa pakai kedua dalam penyimpanan stasioner atau statis, seperti meningkatkan kinerja jaringan dan integrasi energi terbarukan, mengisi daya kendaraan listrik, digunakan untuk *powerwall*, generator dan sebagainya. Lalu yang terakhir baterai yang tergolong dalam kelompok pembuangan atau fasilitas pengelolaan limbah adalah baterai yang sudah tidak bisa dipakai atau sudah mengalami kerusakan yang parah. Baterai tersebut akan masuk ke tempat pembuangan sampah atau fasilitas pembuangan lainnya tanpa pemulihan nilai sisa apa pun.

Pada pengelompokan limbah baterai pada kendaraan listrik terdapat spesifikasi yang harus diperhatikan, spesifikasi tersebut merupakan suatu hal yang akan menjadi tolak ukur dalam menentukan kelompok dari sampah baterai [31]. Pemangku kepentingan 4 menyatakan bahwa untuk menentukan bahwa baterai tergolong dalam remanufaktur, *reuse*, *recycle*, dan sampah dapat dilihat dari umur baterai, yaitu dengan melihat kadar *State of Health (SoH)* pada baterai. Pada Tabel 3 akan dijelaskan dengan lebih rinci mengenai spesifikasi tersebut.

Tabel 3. Spesifikasi Pengelompokan Limbah Baterai

Remanufaktur atau Penggunaan Kembali (<i>Reuse</i>)	Daur Ulang (<i>Recycling</i>)	Sampah (<i>Waste</i>)
<ul style="list-style-type: none"> - Kadar <i>State of Health (SoH)</i> diatas 70-80%. - Memiliki degradasi kapasitas kurang dari 20-30%. - Tidak menunjukkan tanda-tanda pemanasan berlebih atau termal runaway - Terdapat kerusakan kecil, seperti goresan atau penyok kecil. - Memiliki resistansi internal tidak lebih dari dua kali lipat dari resistansi awalnya. - Variasi tegangan antar sel tidak lebih dari 0,1 volt (100 mV), idealnya di bawah 0,05 volt (50 mV). 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>State of Health (SoH)</i> di bawah 70%. - Terdapat kerusakan fisik yang signifikan dan ada kebocoran. - Mengalami pemanasan berlebih selama pengisian atau penggunaan. - Memiliki variasi tegangan antar sel yang sangat tinggi (lebih dari 0,1 volt). - Memiliki kapasitas sel-sel dalam paket baterai bervariasi lebih dari 10%. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>State of Health (SoH)</i> di bawah 50%. - Mengalami kerusakan fisik yang berat, seperti penyok atau pecah. - Menunjukkan adanya kebocoran elektrolit. - Casing atau lapisan luar yang rusak atau terbuka. - Mengalami kerusakan internal, seperti short circuit atau sel yang terbakar didalamnya. - Menunjukkan variasi tegangan yang sangat tinggi (lebih dari 0,2 volt).

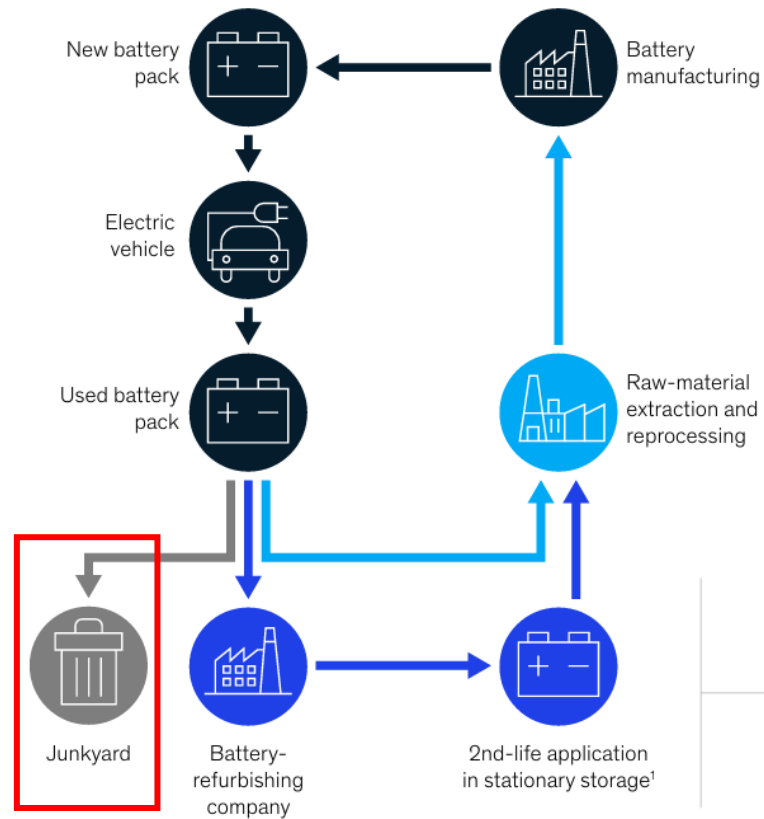
Remanufaktur atau Penggunaan Kembali (<i>Reuse</i>)	Daur Ulang (<i>Recycling</i>)	Sampah (<i>Waste</i>)
<ul style="list-style-type: none"> - Perbedaan kapasitas antar sel tidak lebih dari 5-10% dari kapasitas nominal. - Variasi resistansi internal antar sel tidak lebih dari 10-20% dari nilai rata-rata resistansi internal. 		<ul style="list-style-type: none"> - Memiliki perbedaan kapasitas sel yang sangat besar (lebih dari 20%). - Resistansi internal yang meningkat lebih dari tiga kali lipat dari nilai awal.

E. Model Siklus Hidup Baterai Kendaraan Listrik

Baterai kendaraan listrik rata-rata akan bertahan sekitar sepuluh tahun atau lebih. Seperti yang telah dikatakan oleh Pemangku Kepentingan 1 bahwa baterai NMC dapat digunakan hingga 1000 kali siklus atau sekitar 10 tahun. Yang menentukan masa pakai baterai kendaraan listrik sebelum mengalami penurunan performa adalah jumlah siklus pengisian daya yang dilaluinya. Sebagian besar baterai pada kendaraan listrik akan mempertahankan kapasitas

pengisian dayanya melalui 1000 siklus pengisian daya lengkap yaitu, dari daya kosong hingga 0% dan pengisian ulang hingga 100%. Karena kendaraan listrik memiliki pengaman yang mencegah baterai terkuras habis sepenuhnya serta pengisian daya hingga kapasitas 100%.

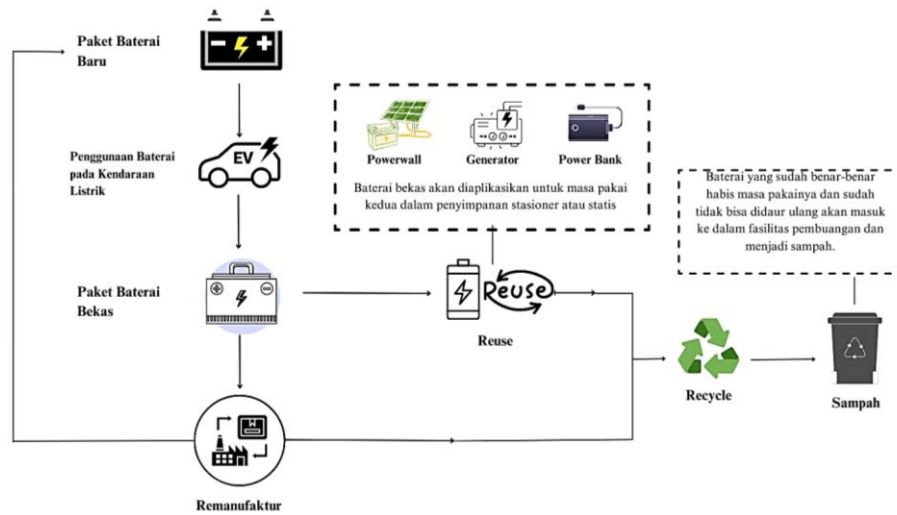
Bila baterai sudah rusak hingga jarak tempuhnya berkurang sekitar 30% dari jarak tempuh yang diharapkan, baterai akan diganti. Selanjutnya baterai akan dibuang ke tempat pembuangan [30].



Gambar 3. Model Siklus Hidup Baterai Kendaraan Listrik Saat Ini Sumber : [30]

Berdasarkan gambar 3 baterai yang telah habis masa pakainya akan langsung dibuang ke sampah (kotak merah). Namun, Baterai kendaraan Listrik yang sudah rusak atau sudah habis masa pakainya tidak bisa dibuang langsung begitu saja.

Gambar 4 akan menggambarkan bagaimana siklus hidup baterai kendaraan listrik dengan menerapkan konsep ekonomi sirkular. Dengan menerapkan ekonomi sirkular, akan menciptakan siklus hidup baterai yang lebih berkelanjutan.

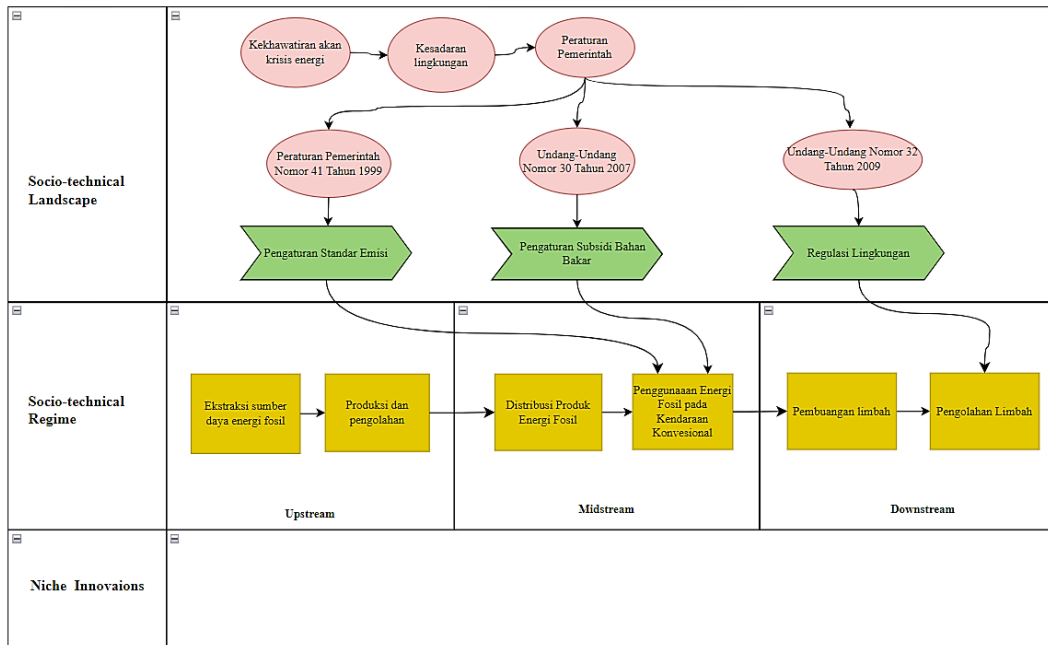


Gambar 4. Model Siklus Hidup Baterai Kendaraan Listrik dengan Penerapan Konsep Ekonomi Sirkular

Pada gambar 4 dijelaskan bahwa baterai kendaraan listrik yang sudah tidak layak digunakan dalam kendaraan dapat dimanfaatkan kembali melalui beberapa langkah. Pertama, baterai tersebut bisa digunakan untuk aplikasi sekunder seperti sistem penyimpanan energi stasioner. Jika memungkinkan, baterai dapat diremanufaktur dengan proses pemeriksaan dan perbaikan untuk meningkatkan performanya. Jika baterai tidak bisa di-reuse atau diremanufaktur, langkah selanjutnya adalah daur ulang, di mana material utama seperti nikel dan kobalt diekstraksi dan dipulihkan untuk digunakan dalam produksi baterai baru, mengurangi dampak ekologis. Saat ini, di Indonesia, daur ulang baterai masih terbatas karena jumlah baterai bekas yang tersedia belum signifikan. Baterai yang tidak bisa didaur ulang akan diolah di fasilitas pembuangan limbah, mengikuti prosedur yang tepat.

F. Model *Multi Level Perspective* (MLP)

Transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik dari *multi level perspective (MLP)*, yang terdiri dari tiga elemen, yaitu lanskap sosial-teknis, rezim sosial-teknis, dan inovasi khusus. Transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik mencakup rezim lama, atau dalam hal ini kendaraan konvensional yang menggunakan energi fosil yang masih mendominasi sektor transportasi di Indonesia. Serta munculnya potensi rezim baru, atau dalam hal ini kendaraan listrik yang menggunakan energi terbarukan, yaitu baterai NMC. Gambar 5 menunjukkan MLP energi fosil pada kendaraan konvensional sebagai rezim lama, sedangkan Gambar 6 menggambarkan MLP baterai pada kendaraan listrik sebagai rezim baru.



Legenda :



Gambar 5. Model MLP untuk Energi Fosil pada Kendaraan Konvensional sebagai Rezim Lama

Model MLP kendaraan konvensional sebagai rezim lama telah dibuat pada gambar 5 Pendekatan MLP terdiri dari tiga tingkatan, yaitu lanskap sosio-teknis di tingkat makro, rezim sosio-teknis di tingkat meso, dan inovasi khusus di tingkat mikro [13].

a. Lanskap Sosio-Teknis

Pada tingkat makro, lanskap sosio-teknis terdiri dari beberapa faktor lanskap (elips merah muda) yang memberikan tekanan pada rezim sosio-teknis serta memfasilitasi transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik. Faktor-faktor lanskap ini saling terkait satu sama lain dan dapat menghasilkan “produk lanskap”. Faktor lanskap pada rezim lama terdiri dari kekhawatiran akan krisis energi. Hal tersebut didasari oleh seiring dengan meningkatnya jumlah kendaraan bermotor, konsumsi bahan bakar juga akan semakin meningkat. Nantinya dikhawatirkan akan menyebabkan kelangkaan bahan bakar fosil bahkan krisis energi [2]. Selanjutnya faktor kesadaran lingkungan, yang didasari oleh pernyataan pemangku kepentingan 3, bahwa penting adanya kesadaran akan lingkungan agar nantinya dapat mengurangi dampak negatif dari lingkungan. Lalu ada peraturan pemerintah, yaitu Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999, Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007, dan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009. Dari beberapa faktor lanskap tersebut akan dihasilkan produk lanskap, yaitu pengaturan standar emisi, pengaturan subsidi bahan bakar, dan regulasi lingkungan. Produk lanskap tersebut akan berperan sebagai faktor pendukung utama untuk mengubah kendaraan konvensional yang menggunakan

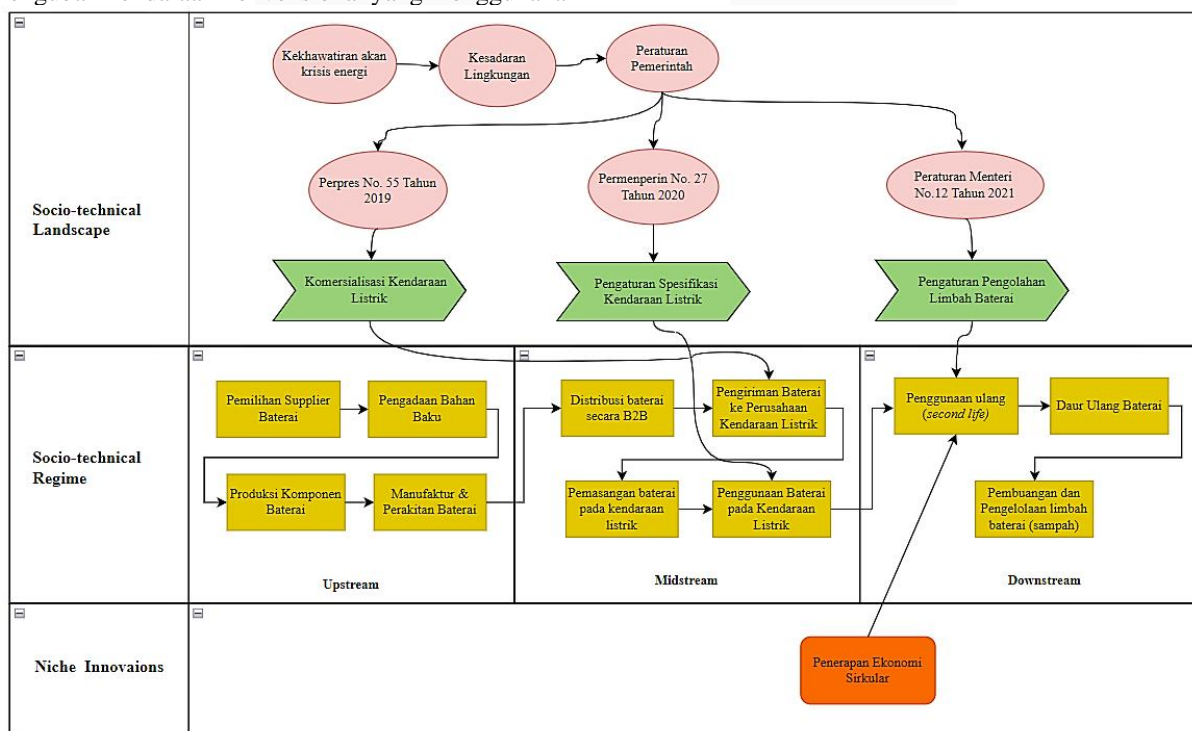
energi fosil ke kendaraan listrik yang menggunakan energi terbarukan.

b. Rezim Sosio-Teknis

Pada tingkat meso, rezim sosio-teknis terdiri dari serangkaian proses rantai pasok rezim lama. Proses-proses ini diklasifikasikan menjadi hulu, tengah, dan hilir yang disimbolkan dengan persegi panjang kuning. Proses hulu energi fosil pada kendaraan konvensional dimulai dari tahap ekstraksi sumber daya energi fosil dengan melakukan pengeboran sumur di darat atau lepas pantai untuk mengambil minyak mentah dan gas alam dari bawah tanah. Setelah itu, tahap selanjutnya adalah proses produksi dan pengolahan. Lalu bagian tengah terdiri dari proses distribusi produk energi fosil dan penggunaan energi fosil pada kendaraan konvensional. Selanjutnya bagian hilir, pembuangan dan pengolahan limbah. Pada rezim lama, rantai pasok kendaraan konvensional yang mencakup hulu, tengah, dan hilir berada dalam kondisi stabil dan perlu diputus agar transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik bisa terjadi. Selain itu jika kondisi pada rezim lama terus stabil, maka lama-lama akan dapat menimbulkan krisis energi karena penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar kendaraan konvensional secara terus menerus.

c. Inovasi Khusus

Pada tingkat mikro, inovasi khusus pada rezim lama tidak ada karena diperlukan adanya transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik



Gambar 6. Model MLP Baterai pada Kendaraan Listrik sebagai Rezim Baru

Model MLP kendaraan Listrik sebagai rezim baru telah dibuat pada gambar Pendekatan MLP terdiri dari tiga tingkatan, yaitu lanskap sosio-teknis di tingkat makro, rezim sosio-teknis di tingkat meso, dan inovasi khusus di tingkat mikro [11].

a. Lanskap Sosio-Teknis

Pada tingkat makro, lanskap sosio-teknis terdiri dari beberapa faktor lanskap (elips merah muda) yang memberikan tekanan pada rezim sosio-teknis. Faktor lanskap pada rezim baru terdiri dari kekwawatiran akan krisis energi. Hal tersebut didasari oleh seiring dengan meningkatnya jumlah kendaraan bermotor, konsumsi bahan bakar juga akan semakin meningkat. Nantinya dikhawatirkan akan menyebabkan kelangkaan bahan bakar fosil bahkan krisis energi [2]. Selanjutnya faktor kesadaran lingkungan, yang didasari oleh pernyataan pemangku kepentingan 3, bahwa penting adanya kesadaran akan lingkungan agar nantinya dapat mengurangi dampak negatif dari lingkungan (Lampiran 3). Selanjutnya terdapat peraturan pemerintah yang terdiri dari, Peraturan Presiden No. 55 tahun 2019, Peraturan Menteri No. 27 Tahun 2020, dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) No. 12 Tahun 2021. Selanjutnya faktor-faktor tersebut saling terkait satu sama lain dan dapat menghasilkan “produk lanskap” yang dapat berperan sebagai faktor pendukung utama untuk mengubah kendaraan konvensional ke kendaraan listrik. Produk lanskap yang dihasilkan adalah komersialisasi kendaraan listrik, pengaturan spesifikasi kendaraan Listrik dan pengaturan pengelolaan limbah baterai.

b. Rezim Sosio-Teknis

Pada tingkat meso, rezim sosio-teknis terdiri dari serangkaian proses rantai pasok rezim baru. Proses-proses ini diklasifikasikan menjadi hulu, tengah, dan hilir yang disimbolkan dengan persegi panjang kuning. Dalam diagram alur rantai pasok ini, proses hulu kendaraan listrik dimulai dengan pemilihan *supplier* baterai, pengadaan bahan baku, produksi komponen baterai, dan manufaktur serta proses perakitan baterai. Setelah itu, tahap selanjutnya adalah proses distribusi baterai. Lalu dilanjutkan dengan proses pengiriman baterai ke perusahaan kendaraan listrik di Indonesia. Selanjutnya dilakukan pemasangan baterai pada kendaraan listrik dan penggunaan baterai pada kendaraan Listrik. Selanjutnya bagian hilir yaitu, baterai yang telah habis masa pakainya akan dilakukan proses penggunaan ulang (*second life*). Setelah itu dilakukan daur ulang dan dilanjutkan dengan pembuangan dan pengelolaan limbah baterai

c. Inovasi Khusus

Pada tingkat mikro, inovasi khusus pada rezim baru adalah penerapan ekonomi sirkular pada baterai kendaraan listrik. Penerapan ekonomi sirkular pada baterai kendaraan listrik merupakan sebuah inovasi yang berpotensi menciptakan peluang transisi kendaraan konvensional ke kendaraan listrik. Dalam penelitian ini inovasi tersebut akan berfokus pada bagaimana cara untuk memperpanjang siklus hidup baterai melalui proses *reuse*, remanufaktur, dan *recycle*. Pada inovasi khusus penulis mengusulkan melakukan ekonomi sirkular secara *looping*. Pada proses

penyortiran baterai yang telah dijelaskan pada gambar 2, diharapkan adanya kolaborasi erat antara pemanufaktur kendaraan listrik dan perusahaan baterai kendaraan listrik yang bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah baterai. Kerja sama tersebut akan memungkinkan pemanufaktur baterai untuk bekerja sama dengan perusahaan baterai kendaraan listrik. Dengan demikian, pemanufaktur baterai dapat berfungsi sebagai titik pengumpulan resmi bagi baterai kendaraan listrik yang telah rusak atau sudah mencapai akhir masa pakainya. Melalui inisiatif tersebut, baterai-baterai yang tidak lagi digunakan dapat dikembalikan kepada produsen untuk diproses lebih lanjut. Dengan demikian, langkah ini tidak hanya mengurangi limbah baterai, tetapi juga memperkuat konsep ekonomi sirkular di mana sumber daya dimanfaatkan secara maksimal dalam siklus hidup baterai. Proses ini menciptakan nilai tambah bagi semua pihak yang terlibat, serta mendukung keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan dampak negatif dari limbah baterai. Selain itu, akan tercipta ekonomi sirkular dengan proses *looping* untuk baterai kembali ke produsen.

G. Verifikasi dan Validasi

Hasil wawancara dengan berbagai pemangku kepentingan mengenai baterai kendaraan listrik mengungkapkan beberapa aspek penting terkait siklus hidup, penggunaan, dan pengelolaan baterai. Pertama, baterai kendaraan listrik memiliki umur siklus sekitar 1000 kali siklus, dengan variasi karakteristik tergantung jenis baterai yang digunakan, seperti FLP atau NMC. Baterai tersebut harus melewati proses *reuse*, remanufaktur, dan *recycle* sebelum benar-benar dibuang, dan proses ini masih dalam tahap pengembangan di Indonesia dengan tantangan terkait infrastruktur dan regulasi. Baterai yang sudah tidak dapat digunakan untuk kendaraan dapat dialihkan untuk aplikasi energi terbarukan seperti powerwall atau powerbank sebelum didaur ulang. Pengelolaan limbah baterai masih menghadapi kendala, tetapi kerjasama antara pemerintah, industri, dan masyarakat diperlukan untuk meningkatkan efektivitas daur ulang dan kesadaran publik.

Model siklus hidup baterai yang telah dikembangkan dan divalidasi oleh para pemangku kepentingan menunjukkan bahwa proses *reuse*, remanufaktur, dan *recycle* sangat penting dalam pengelolaan baterai kendaraan listrik. Model tersebut juga mendukung transisi menuju kendaraan listrik dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi baterai. Verifikasi dan validasi terhadap model dilakukan melalui wawancara dengan berbagai pihak yang berkompeten, yang memastikan bahwa model tersebut sesuai dengan kondisi baterai saat ini dan dapat mendukung pengembangan Closed Loop Supply Chain (CLSC) untuk pengelolaan baterai yang lebih berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan penelitian dan hasil penelitian di atas maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini:

- a. Baterai yang telah habis masa pakainya tidak bisa langsung dibuang begitu saja, namun harus melewati proses *reuse*, remanufaktur dan *recycle*. Siklus hidup baterai kendaraan listrik dimulai dari proses ekstraksi bahan baku yang kemudian diolah menjadi komponen baterai. Setelah dirakit, baterai ini digunakan dalam kendaraan listrik untuk menyimpan dan menyediakan energi bagi motor listrik. Baterai kendaraan listrik yang sudah habis masa akan melewati proses *reuse*, remanufaktur terlebih dahulu, selanjutnya baterai yang sudah tidak bisa di *reuse* dan di remanufaktur akan di *recycle*. Proses *recycle* sendiri harus melewati proses sesuai dengan prosedur yang sudah ditetapkan. Setelah itu, baterai yang tidak bisa di *recycle*, baru akan dibuang dan dilakukan pengelolaan pada limbah baterai kendaraan listrik.
- b. Transisi dari kendaraan konvensional yang bergantung pada energi fosil ke kendaraan listrik memerlukan pendekatan yang komprehensif melalui dua model *Multi-Level Perspective (MLP)*. Model pertama mengkaji rezim lama, yaitu rantai pasok energi fosil yang bersifat linear dan tidak berkelanjutan, yang menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan potensi krisis energi serta dampak negatif terhadap lingkungan. Model kedua, yang berfokus pada rezim baru, yaitu baterai untuk kendaraan listrik, menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan. Dengan mengalihkan penggunaan energi dari fosil ke listrik melalui komersialisasi kendaraan listrik, diharapkan tercipta lingkungan yang lebih bersih dan mendukung keberlanjutan jangka panjang. Inovasi signifikan dalam sektor transportasi diperlukan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas dan untuk mendukung transisi ini.

REFERENSI

- [1] Korlantas Polri, "Jumlah Data Kendaraan per Pulau," Electronic Registration Identification. Diakses: 13 November 2023. [Daring]. Tersedia pada: <http://rc.korlantas.polri.go.id:8900/eri2017/laprekappulau.php>
- [2] R. Ansah, "Dampak Kendaraan Listrik Terhadap Lingkungan dan Sumberdaya Alam: Isu Mutakhir dalam Transportasi Berkelanjutan," *Journal Of Health And Medical Research*, vol. 3, no. 1, hlm. 208–211, 2023.
- [3] J. L. Richter, "A circular economy approach is needed for electric vehicles," 1 Januari 2022, *Nature Research*. doi: 10.1038/s41928-021-00711-9.
- [4] A. Siahaan, M. Asrol, F. E. Gunawan, dan F. Alamsjah, "Formulating the Electric Vehicle Battery Supply Chain in Indonesia," *TEM Journal*, vol. 10, no. 4, hlm. 1900–1911, 2021, doi: 10.18421/TEM104-54.
- [5] Y. Chen *dkk.*, "A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards," 1 Agustus 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jchem.2020.10.017.
- [6] M. Simonetto, F. Sgarbossa, D. Battini, dan K. Govindan, "Closed loop supply chains 4.0: From risks to benefits through advanced technologies. A literature review and research agenda," 1 November 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108582.
- [7] P. K. Mallick, K. B. Salling, D. C. A. Pigosso, dan T. C. McAloone, "Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review," 15 Februari 2023, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117017.
- [8] E. Ribeiro da Silva, J. Lohmer, M. Rohla, dan J. Angelis, "Unleashing the circular economy in the electric vehicle battery supply chain: A case study on data sharing and blockchain potential," *Resour Conserv Recycl*, vol. 193, hlm. 2–9, Jun 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106969.
- [9] V. D. Dragomir dan M. Dumitru, "Practical solutions for circular business models in the fashion industry," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 4, hlm. 2–6, Jul 2022, doi: 10.1016/j.clscn.2022.100040.
- [10] Y. A. Fatimah, D. Kannan, K. Govindan, dan Z. A. Hasibuan, "Circular economy e-business model portfolio development for e-business applications: Impacts on ESG and sustainability performance," *J Clean Prod*, vol. 415, hlm. 2–10, Agu 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137528.
- [11] S. W. Yudha, B. Tjahjono, dan P. Longhurst, "Sustainable Transition from Fossil Fuel to Geothermal Energy: A Multi-Level Perspective Approach," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, hlm. 7–22, Okt 2022, doi: 10.3390/en15197435.
- [12] R. Fuaddi *dkk.*, "Studi Perkembangan Ekosistem Kendaraan Listrik di Kota Padang," *MSI Transaction on Education*, vol. 4, hlm. 2721–4893, 2023, doi: 10.46574/mtd.v4i2.108.
- [13] I. Energy Agency, "Global EV Outlook 2020 Entering the decade of electric drive?," 2020. Diakses: 16 November 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- [14] V. Tulus dan P. Sidabutar, "Kajian pengembangan kendaraan listrik di Indonesia: prospek dan hambatanya," *Jurnal Paradigma Ekonomika*, vol. 15, no. 1, hlm. 2085–1960, 2020.
- [15] E. E. Nurmelasari dan W. F. Ridho, "Pemanfaatan Penggunaan dan Pengoperasian Mesin Otomatis pengelolaan Sampah Botol

- Plastik (RVM) pada Masyarakat berbasis Ekonomi Sirkuler di kota D.I Yogyakarta,” *Jurnal Pelayanan dan Pengabdian Masyarakat Indonesia (JPPMI)*, vol. 2, no. 2, hlm. 121–129, 2023, doi: 10.55606/jppmi.v2i2.389.
- [16] J. Kirchherr, D. Reike, dan M. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 127, hlm. 221–232, Des 2017, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2017.09.005.
- [17] Bappenas, “Ringkasan Bagi Pembuat Kebijakan: Manfaat Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan dari Ekonomi Sirkular di Indonesia,” Jakarta, 2021.
- [18] C. mei Ma, “Impacts of demand disruption and government subsidy on closed-loop supply chain management: A model based approach,” *Environ Technol Innov*, vol. 27, hlm. 3–6, Agu 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102425.
- [19] G. Shu San, D. Wahjudi, dan Y. Y. Tanoto, “Remanufacturing: Strategi dan Desain dalam Rantai Pasok Lingkaran Tertutup,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 18, no. 2, hlm. 51–59, 2021, doi: 10.9744/jtm.18.2.51-59.
- [20] M. Tavana, H. Kian, A. K. Nasr, K. Govindan, dan H. Mina, “A comprehensive framework for sustainable closed-loop supply chain network design,” *J Clean Prod*, vol. 332, hlm. 2–3, Jan 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129777.
- [21] J. T. Marcos, C. Scheller, R. Godina, T. S. Spengler, dan H. Carvalho, “Sources of uncertainty in the closed-loop supply chain of lithium-ion batteries for electric vehicles,” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 1, hlm. 2–14, Okt 2021, doi: 10.1016/j.clscn.2021.100006.
- [22] A. Z. Fanani, E. Rosyida, dan S. Puspitorini, “Pemodelan Sistem Reverse Logistic Pet Bottle Bekas Menggunakan Konsep Vendor Managed Inventory,” *Smart City And Sustainable Development Goals*, vol. 1, no. 1, hlm. 15–19, 2022.
- [23] P. R. Nanayakkara, M. M. Jayalath, A. Thibbotuwawa, dan H. N. Perera, “A circular reverse logistics framework for handling e-commerce returns,” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 5, hlm. 2–5, Des 2022, doi: 10.1016/j.clscn.2022.100080.
- [24] S. Guo, B. Shen, T. M. Choi, dan S. Jung, “A review on supply chain contracts in reverse logistics: Supply chain structures and channel leaderships,” *J Clean Prod*, vol. 144, hlm. 387–402, Feb 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.112.
- [25] O. Osunmuyiwa, F. Biermann, dan A. Kalfagianni, “Applying the multi-level perspective on socio-technical transitions to rentier states: the case of renewable energy transitions in Nigeria,” *Journal of Environmental Policy and Planning*, vol. 20, no. 2, hlm. 143–156, Mar 2018, doi: 10.1080/1523908X.2017.1343134.
- [26] H. El Bilali, “The multi-level perspective in research on sustainability transitions in agriculture and food systems: A systematic review,” 1 April 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/agriculture9040074.
- [27] Pemerintah Indonesia, “Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 Tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) untuk Transportasi Jalan,” Jakarta, Agu 2019. [Daring]. Tersedia pada: www.peraturan.go.id
- [28] M. Maulvi Aldi Nauri, M. Sulthoni Aziz, M. Yusuf Zenidin Zidan Pratama, U. Kamal, dan M. Adymas Hikal Fikri, “Strategi Penanganan Limbah Baterai Kendaraan Listrik Demi Masa Depan Indonesia yang Lebih Bersih,” 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://jurnal.kolibi.org/index.php/kultura>
- [29] A. Accardo, G. Dotelli, M. L. Musa, dan E. Spessa, “Life cycle assessment of an NMC battery for application to electric light-duty commercial vehicles and comparison with a sodium-nickel-chloride battery,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 3, hlm. 1–32, Feb 2021, doi: 10.3390/app11031160.
- [30] Engel Hauke, Hertzke Patrick, dan Siccardo Giulia, “Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage,” 2019.
- [31] A. Purwani, W. Sutopo, M. Hisjam, dan A. Widiyanto, “Approach For Determining Cut-off Values For Electric Motorcycle Swap Battery Before The End-of-life In The Recycling Classification,” *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 28, no. 4, hlm. 811–820, 2024, doi: 10.6180/jase.202504_28(4).0013.