

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan teoritis yang dimuat pada bab ini mengacu pada fenomena dan masalah yang sedang dikaji disertai dengan pendekatan teori. Pendekatan ini kemudian digunakan untuk mendukung hasil analisis dari berbagai sudut pandang penelitian.

2.1 Kendaraan Listrik

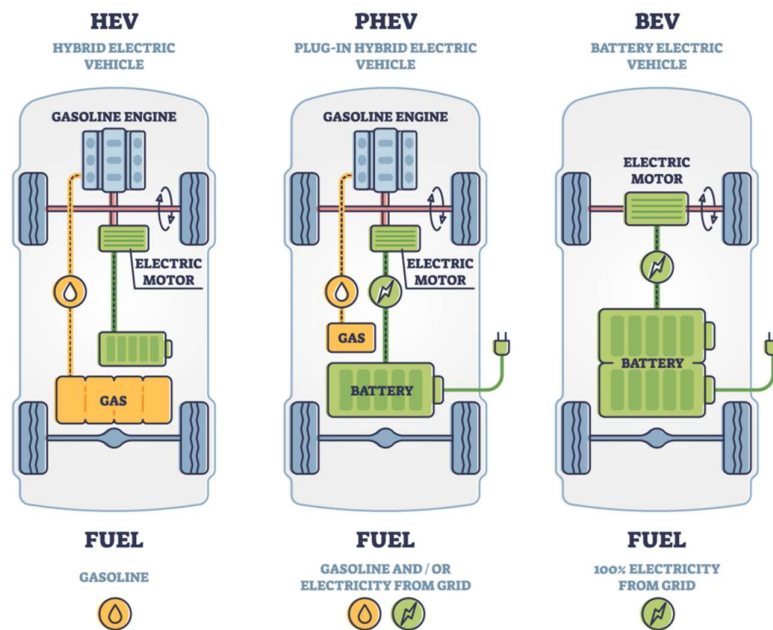
Kendaraan listrik mulai dikembangkan sejak tahun 1828 oleh seorang insinyur Hungaria, Jedlik Anyos namun kemudian terhenti karena dianggap tidak komersil. Riset ini terhenti cukup lama dan dimulai kembali oleh Thomas Parker (Inggris, 1884), Camille Jenatzy (Belgia, 1899), serta A.L Ryker dan William Morrison (Amerika Serikat, 1891) [15]. Biaya produksi baterai yang tinggi dan semakin merebaknya penemuan sumur minyak di berbagai belahan dunia menyebabkan harga bahan bakar minyak jauh lebih murah. Hal ini semakin memperlambat kemajuan industri kendaraan listrik karena dianggap tidak ekonomis [16]. Seiring berjalannya waktu, isu kelangkaan minyak bumi pun tak terelakkan dan membalikkan keadaan bahwa perlu sumber energi lain bagi transportasi yaitu listrik yang dinilai lebih ekonomis daripada kendaraan berbahan bakar fosil serta dapat mengurangi emisi secara signifikan [12]. Oleh karena itu, banyak negara yang terus mengembangkan teknologi kendaraan listrik serta mengenalkannya secara luas kepada masyarakat [15].

Berikut merupakan berbagai jenis kendaraan yang diklasifikasikan sebagai kendaraan listrik:

1. *Battery Electric Vehicle* (BEV)

Kendaraan listrik ini yang menggunakan baterai sebagai penyimpan energi listrik yang nantinya dikonversi menjadi energi mekanik oleh motor listrik. Energi listrik dalam baterai ini diperoleh melalui proses pengisian dari sumber energi listrik eksternal seperti jaringan listrik PLN [17]. BEV tidak menghasilkan emisi CO₂ secara langsung karena tidak terdapat proses

pembakaran. BEV memiliki siklus hidup emisi GRK yang lebih rendah dibandingkan kendaraan bermesin pembakaran internal (ICEV) ketika BEV diisi dengan sumber listrik rendah karbon atau energi listrik terbarukan [18]. Jarak tempuh BEV adalah 100-250 km dengan sekali pengisian daya, dengan konsumsi energi 15-20 kWh per 100 km, tergantung model dan spesifikasinya [19], [20], [21]. BEV dengan baterai yang lebih besar dapat memiliki jarak tempuh 300-500 km. BEV secara signifikan kurang menguntungkan dibandingkan jenis kendaraan listrik lainnya karena jarak tempuh yang jauh lebih pendek dan waktu pengisian daya yang jauh lebih lama. Cara termudah untuk mengatasi masalah ini adalah dengan membuat dan menerapkan *engine management system* (EMS) yang dirancang khusus untuk BEV [22], [23].



Gambar 2.1 Perbedaan BEV, HEV, dan PHEV

(Sumber: www.power.com)

2. Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Sumber energi HEV atau kendaraan listrik hibrida (KLH) merupakan kombinasi teknologi pada BEV dan ICEV sebagai sumber tenaga pendorongnya [24]. HEV diklaim memiliki efisiensi lebih tinggi dengan emisi

dan kebisingan yang rendah tanpa mengubah gaya berkendara [25]. Dikarenakan terdapat dua sumber energi, maka bahan bakar yang digunakan pada HEV akan lebih sedikit, dengan sebagian energinya berasal dari motor listrik. Sebagian besar HEV menggunakan ICE dengan siklus Atkinson yang 10% lebih efisien dibandingkan siklus otto/konvensional. Keunggulan lainnya dari mesin dengan siklus Atkinson adalah tenaga di putaran atas lebih ringan. Meskipun demikian, mesin ini memiliki kelemahan pada torsi putaran bawah yang lebih rendah sehingga pada HEV motor akan memberikan tambahan tenaga pada saat akselerasi atau putaran bawah [24]. Generator yang digerakkan oleh ICE dapat digunakan untuk memutar motor listrik sekaligus mengisi daya baterai. HEV memiliki beberapa fitur yang bisa meningkatkan efisiensi, salah satunya adalah fitur *regenerative braking* yang dapat mengubah energi kinetik menjadi energi listrik [26].

3. *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV)

Jenis ini pada prinsipnya mirip dengan HEV, namun berbeda pada sistem pengisian daya listriknya. Daya baterai pada beberapa tipe HEV dapat terisi dari gerakan sistem internal kendaraan. Namun terdapat HEV yang memerlukan jaringan listrik eksternal untuk pengisian daya baterainya. HEV tersebut adalah *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) [24].

4. *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV)

Kendaraan ini diklaim tidak menghasilkan emisi apa pun. Jenis *fuel cell* yang paling banyak digunakan yaitu *polymer electrolyte membrane* (PEM). Bahan bakar yang digunakan kendaraan ini berupa hidrogen dan setelah bereaksi dengan PEM akan membentuk air sebagai hasil reaksi. Efisiensi FCEV lebih tinggi dibandingkan kendaraan konvensional dengan biaya hidrogen dan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar atau gas konvensional. Namun dari segi harga, FCEV ini lebih mahal dibandingkan kendaraan konvensional. Prinsip kerjanya, FCEV menghasilkan listrik terus menerus dan memberi suplai daya ke motor dan menyimpan sisa daya ke dalam baterai litium. FCEV menghasilkan kebisingan yang rendah sehingga

pengemudi nyaman dalam berkendara. Mengingat penyimpanan hidrogen lebih sulit dibandingkan dengan bahan bakar atau gas lainnya, penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan keselamatan [27].

Menurut Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) untuk Transportasi Jalan, motor listrik adalah peralatan elektromekanik yang mengonsumsi tenaga listrik untuk menghasilkan energi mekanik sebagai penggerak. Sedangkan KBLBB adalah kendaraan yang digerakkan dengan motor listrik dan mendapatkan pasokan sumber daya tenaga listrik dari baterai secara langsung di kendaraan maupun dari luar. KBLBB dikelompokkan menjadi 2 (dua) jenis, yaitu: KBLBB beroda dua dan/atau roda tiga; dan KBLBB beroda empat atau lebih.

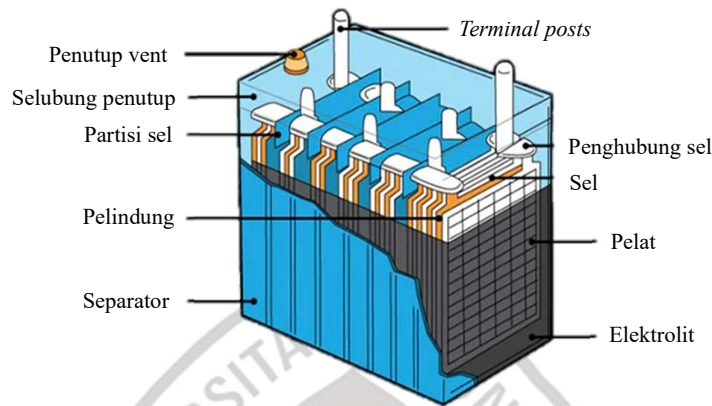
2.1.1 Baterai Kendaraan Listrik

Baterai pada kendaraan listrik berfungsi sebagai sumber energi utama yang menyuplai arus listrik untuk menggerakkan kendaraan, termasuk juga untuk lampu dan komponen-komponen kelistrikan lainnya [28]. Bahan baku baterai berasal dari bahan tambang mineral seperti lithium, nikel, kobalt, dan mangan [15]. Jenis baterai kendaraan listrik terdiri dari:

a. Baterai *Lead-Acid* (*Pb-Acid*)

Baterai ini menggunakan elektrolit cair yang berbahan dasar asam timbal (Pb), disebut juga baterai *sealed lead acid* (SLA) dan merupakan salah satu teknologi baterai tertua yang masih digunakan di seluruh dunia. Baterai ini mampu menyimpan energi sebanyak 20-40 Wh/kg pada kondisi 100% dan memiliki siklus hidup yang kecil dibandingkan dengan baterai jenis lain seperti nikel metal hidrida (NiMH). Temperatur optimum untuk baterai Lead-Acid adalah 25°C atau 77°F. Peningkatan temperatur akan memperpendek umur baterai, yaitu setiap kenaikan sebesar 8°C akan mengurangi setengah dari masa pakai baterai. Ketika temperatur terjaga pada suhu optimum, maka baterai dapat digunakan hingga 10 tahun. Sementara itu, ketika beroperasi pada temperatur

33°C, baterai dapat bertahan secara efektif hingga 5 tahun [28]. Bagian-bagian baterai SLA dapat digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bagian Baterai *Lead-Acid*

(Sumber: www.tycorun.com)

Kelemahan baterai SLA yaitu memiliki rasio energi yang rendah terhadap berat maupun volumenya, serta dianggap tidak ramah lingkungan karena mengandung timbal dan asam. Meskipun demikian, biaya produksinya yang rendah (sekitar 100 USD/kWh) membuatnya cocok untuk kendaraan skala kecil dan berperforma ringan [29], [30].

b. Baterai Nikel Metal Hidrida (NiMH)

Baterai ini merupakan salah satu jenis baterai yang memiliki performa cukup baik. Baterai nikel-metal hidrida terbagi menjadi dua jenis, yaitu baterai nikel-metal hidrida bertekanan tinggi dan baterai nikel-metal hidrida bertekanan rendah. Zat aktif positifnya adalah Ni(OH)_2 dan zat aktif negatifnya adalah logam hidrida. Dibandingkan dengan baterai litium-ion, baterai NiMH memiliki teknologi manufaktur yang lebih matang, sehingga biaya produksinya relatif rendah dan lebih ramah lingkungan. Selain itu, baterai ini juga memiliki umur yang panjang. Dalam hal kinerja keselamatan, baterai NiMH lebih aman dibandingkan baterai lithium ion karena kepadatan kapasitasnya yang relatif rendah, namun tetap rawan terhadap *backdraft* [31]. *Backdraft* dapat terjadi ketika pembakaran melambat karena kurangnya oksigen pada bahan bakar gas

yang mudah terbakar (terutama CO) dan asap (terutama hidrokarbon) tetap berada pada suhu di atas titik-api bahan bakar [32].

c. Baterai Ni-Cd

Sesuai namanya, baterai ini memiliki bahan utama nikel (Ni) dan kadmium (Cd) dan mulai digunakan pada tahun 1990-an dalam telekomunikasi dan layanan portabel. Baterai ini menghasilkan kepadatan energi yang tinggi dan memiliki rentang siklus hidup yang panjang (1500 siklus dibandingkan dengan baterai NiMH). Namun, baterai ini dapat menyebabkan kerusakan karena pengosongan daya yang dalam dan waktu pengisian yang lebih cepat. Salah satu kelemahan utamanya adalah penggunaan logam beracun kadmium yang menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia [28].

d. Baterai Li-ion

Baterai *lithium-ion* merupakan jenis baterai yang paling banyak digunakan pada kendaraan listrik saat ini, termasuk di Indonesia. Tipe baterai ini memiliki kemampuan penyimpanan dengan kepadatan energi yang tinggi, kinerja lebih baik pada suhu tinggi, pengisian energi cepat, *self-discharge* rendah, siklus hidup lama, dan ramah lingkungan. Keunggulan terpenting baterai ini yaitu potensi daur ulang berbagai komponen yang digunakan. Namun, minimnya ketersediaan material dan tingginya biaya per kWh (135 USD/kWh) menunjukkan kelemahan yang signifikan [28]. Secara umum, kinerja baterai *lithium-ion* bergantung pada sifat material internalnya. Pemilihan bahan khususnya elektroda positif sangatlah penting karena dapat mengontrol karakteristik baterai seperti daya, keamanan, biaya, dan masa pakai. Bahan elektroda positif dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti *lithium cobalt oxide* (LiCoO_2), *lithium manganese oxide* (LiMn_2O_4), *lithium iron phosphate* (LiFePO_4), *lithium nickel manganese cobalt oxide* ($\text{Li}(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Co})\text{O}_2$), *lithium nickel cobalt aluminum oxide* ($\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2$), dan *lithium titanate* ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) [33], [34], [35].

e. Baterai *Sodium-Nickel Chloride* (Na/NiCl₂)

Baterai *Sodium-Nickel Chloride* (SNC) memiliki suhu pengoperasian yang tinggi (270-350°C), juga dikenal sebagai baterai ZEBRA (*zero-emission battery research activity*). Energi spesifik SNC sebesar 125 Wh/kg dengan efisiensi energi 92%, lebih baik dibandingkan lead-acid, NiCd, dan teknologi baterai NiMH [36]. Kekhawatiran utama baterai ini terletak pada keselamatan operasionalnya karena suhu pengoperasian yang tinggi dan penyimpanan dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, resistansi internal yang tinggi dan *self-discharge* yang lebih cepat menyebabkan rendahnya kemampuan daya baterai SNC [37].

f. *Fuel Cell*

Fuel cell merupakan perangkat elektrokimia yang menggunakan dua proses redoks untuk mengubah energi kimia bahan bakar (biasanya hidrogen) dan zat oksidator menjadi energi listrik. *Fuel cell* memerlukan pasokan bahan bakar dan oksigen yang konstan (biasanya dari udara) untuk mempertahankan reaksi kimia agar terus menghasilkan listrik. Sir William Grove pertama kali menciptakan *fuel cell* pada tahun 1838. Satu abad kemudian, Francis Thomas Bacon menciptakan *fuel cell* hidrogen-oksigen pada tahun 1932 [38]. *Fuel cell* ini menawarkan alternatif yang jauh lebih baik serta dapat mengurangi emisi CO₂ secara signifikan. Namun, *fuel cell* ini tergolong mahal untuk diproduksi karena tingginya biaya katalis (platinum) [28].

g. Superkapasitor

Superkapasitor (SC) atau dikenal juga sebagai ultrakapasitor, merupakan kapasitor berkapasitas tinggi yang menjembatani kesenjangan antara kapasitor elektrolitik dan baterai isi ulang. SC memiliki siklus pengisian dan pengosongan yang lebih banyak dibandingkan baterai. Nguyen dkk. [39] menggunakan SC untuk penyimpanan energi pada kendaraan listrik. Meskipun SC memiliki umur yang panjang, namun terdapat beberapa kelemahan seperti jumlah energi yang disimpan per satuan beratnya lebih rendah dibandingkan dengan baterai elektrokimia.

Masing-masing jenis baterai yang digunakan pada kendaraan listrik memiliki karakteristik tersendiri. Seperti ketiga jenis baterai yang sering ditemui di pasaran dengan karakteristiknya sebagai berikut: (1) kemungkinan baterai *lead-acid* untuk bocor dalam proses penggunaan sangatlah kecil karena sistem segelnya yang rapat, namun kelemahannya terdapat pada siklus penggunaan yang tergolong sangat singkat. (2) Produksi baterai nikel metal hidrida relatif baik dengan biaya produksi rendah, serta lebih baik dari segi keamanan dibandingkan baterai litium. (3) Baterai litium-ion terbuat dari bahan tidak beracun, sehingga dikenal sebagai "baterai ramah lingkungan". Namun, biaya produksinya tergolong tinggi dan memiliki kompatibilitas yang lebih rendah dibandingkan jenis baterai lain [31].

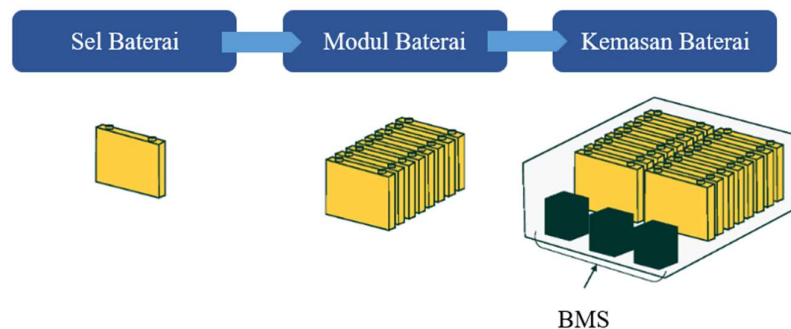
Baterai menjadi salah satu penentu harga jual kendaraan listrik [40] dan karena bahan baku baterai berasal dari bahan tambang mineral, maka di masa yang akan datang penggunaan kendaraan listrik yang masif akan terus meningkatkan permintaan mineral-mineral tersebut [41] dan berimplikasi pada kegiatan pertambangannya [15].

Sistem manajemen baterai atau *battery management system* (BMS) merupakan sebuah sistem yang mengontrol operasional baterai baik melalui elektrik, mekanik, maupun sistem teknologi tingkat lanjut [42]. Tujuan utama BMS adalah untuk melindungi sel baterai dari kerusakan serta memastikan kondisi operasi optimum dari baterai itu sendiri. BMS juga memastikan kondisi sistem penyimpanan baterai melalui monitoring terus-menerus terhadap pengisian-pengosongan daya, temperatur, potensial sel, arus, dan tegangan [28]. Proses pengisian dan pengosongan daya saat kendaraan listrik menempuh perjalanan jauh menjadi sebuah isu penting, dimana hal ini dapat mengakibatkan kerusakan baterai maupun kejutan listrik (*shock hazard*) [43].

Kendaraan listrik merupakan jenis kendaraan ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi yang berkontribusi pada isu perubahan iklim. Meskipun demikian, kendaraan listrik juga menimbulkan bahaya terhadap lingkungan apabila limbah baterainya tidak dikelola dengan baik dan sumber listriknya masih bergantung kepada sumber energi yang tidak terbarukan [28].

Paket baterai pada kendaraan listrik terdiri dari modul baterai yang masing-masing berisi beberapa sel baterai. Macam-macam sel baterai tersebut antara lain [44]:

- Sel prismatic, dengan bentuk persegi panjang dan dibungkus dalam wadah atau selubung yang keras dan kaku, sel ini mudah ditumpuk secara efisien seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3.
- Sel silinder, terbungkus dalam selubung berbentuk silinder yang kaku. Bentuk ini dipercaya dapat mencegah baterai mengalami pembengkakan. Produk EV dari *brand* ternama Tesla dan sebagian besar baterai kendaraan listrik menggunakan tipe sel ini [45].
- Sel kantong (*pouch*), ditempatkan dalam wadah yang fleksibel sehingga dapat memanfaatkan ruang secara efisien. Namun, hal ini menyebabkan baterai lebih rentan terhadap kerusakan dibandingkan kedua sel lainnya dengan wadah yang kaku.



Gambar 2.3 Diagram Tahap Perakitan Baterai dengan Sel Prismatic

(Sumber: [44])

2.1.2 Kendaraan Listrik dalam Mendukung SDGs

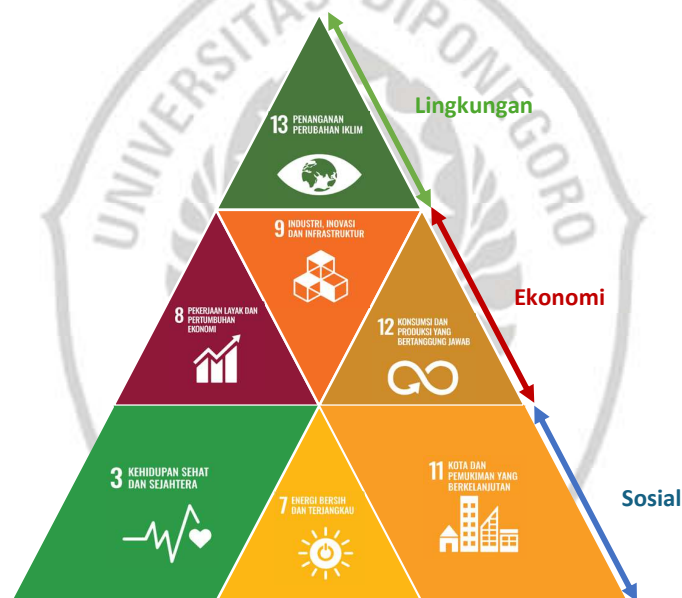
Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) menetapkan 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan/ *Sustainable Development Goals* (SDGs) pada tahun 2015 dalam mencapai visi bersama untuk kehidupan yang baik dan damai bagi dunia dan penduduknya. Menurut *Sustainable Mobility for All* (SuM4All) pada Peta Jalan Aksi Global/ *Global Roadmap of Action* (GRA), target pengurangan emisi gas GRK global dari transportasi yaitu 8 miliar ton CO₂ menjadi 2–4 miliar ton CO₂ pada

tahun 2050, dan *zero emission* pada dekade berikutnya. Industri transportasi menjadi salah satu kunci dalam perjuangan melawan perubahan iklim untuk mencapai SDGs. Kemajuan teknologi transportasi, seperti kendaraan listrik (EV), diharapkan dapat mengurangi emisi secara signifikan terkait transportasi jalan raya yang dihasilkan oleh kendaraan bermesin pembakaran internal (ICEV). Meskipun demikian, dampak lingkungan dari ICEV ditentukan oleh bahan bakar fosil yang digunakan, sementara dampak EV ditentukan oleh energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Pada tahun 2019, kendaraan listrik di seluruh dunia menghasilkan sekitar 51 juta ton CO_{2e}, hampir setengah dari jumlah emisi ICEV dengan ukuran yang sama, dengan total emisi yang dapat dicegah sebesar 53 juta ton CO_{2e} [46].

Industri transportasi dapat dikaitkan dengan hampir semua tujuan SDGs, termasuk pertumbuhan sosial dan ekonomi, peningkatan akses terhadap layanan, peningkatan produksi pertanian, dan menghubungkan komoditas dengan pasar. Pembangunan berkelanjutan memerlukan transportasi berkelanjutan, aman, dan bersih yang tersedia bagi semua orang, dan kendaraan listrik memenuhi semua fitur tersebut. Kendaraan listrik baru-baru ini dikaitkan dengan energi terbarukan, baterai, dan penggunaan lainnya, yang semuanya telah meningkatkan dampak lingkungan dan dapat membantu mencapai SDGs yang relevan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, EV berdampak pada tiga aspek keberlanjutan (sosial, ekonomi, dan lingkungan hidup), serta hubungan yang signifikan dengan 7 (tujuh) dari 17 SDGs [28].

Kendaraan listrik dipromosikan sebagai bagian dari solusi global terhadap kualitas udara dan kehidupan yang sehat bagi penduduk khususnya di perkotaan. Hal ini dapat mendukung SDG ke-3 yaitu Kehidupan Sehat dan Sejahtera dan SDG ke-7 yaitu Energi Bersih dan Terjangkau, khususnya di Indonesia yaitu indikator 7.1.1 Rasio Elektrifikasi, SDG ke-13 yaitu Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan, khususnya pada indikator 11.6.2 (a) Rata-rata tahunan materi partikulat halus PM₁₀ dan (b) Indeks Kualitas Udara. Meningkatnya pasar kendaraan listrik akan berperan dalam pertumbuhan ekonomi dan penciptaan

lapangan kerja baik di bidang produksi maupun pemasaran sehingga akan mendukung SDG ke-8 yaitu Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi. Tumbuhnya kendaraan listrik dapat membuat sektor transportasi menjadi sektor yang adaptif, tangguh, dan berkelanjutan terhadap perubahan kondisi iklim global sekaligus mendorong pertumbuhan ekonomi, seiring dengan tujuan ke-9 yaitu Industri, Inovasi, dan Infrastruktur. Manajemen energi pada kendaraan listrik membutuhkan dukungan jaringan, produksi, dan distribusi listrik yang baik sehingga hal ini dapat mendukung SDG ke-12 yaitu Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab.



Gambar 2.4 Kendaraan Listrik dalam Mendukung SDGs

(Sumber: [28])

Teknologi berbasis baterai pada kendaraan listrik seringkali dikaitkan dengan energi terbarukan yang dapat mempengaruhi lingkungan dan membantu mencapai SDGs yang relevan. Kelebihan kendaraan listrik bagi penanganan perubahan iklim (SDG 13) seringkali dikaitkan dengan kemampuannya untuk meminimalisir emisi dari sumber energi konvensional dengan menggunakan energi terbarukan sebagai sumber listrik. Hal ini membuat semakin banyak negara yang mengadopsi inisiatif lingkungan dalam kebijakan mereka seiring dengan perkembangan pesat kendaraan listrik [47]. IPCC memproyeksikan bahwa

kendaraan listrik harus menggantikan kendaraan berbahan bakar fosil pada tahun 2035–2050 untuk membatasi pemanasan global di bawah 1,5°C. Penggunaan kendaraan listrik di negara maju seperti Eropa, Selandia Baru, Tiongkok, dan Amerika Serikat yang dikombinasikan dengan energi terbarukan diharapkan dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 70% pada tahun 2050 [28]. Strategi ini semakin populer yang dinilai sebagai alternatif ekonomis dan ramah lingkungan. Strategi berkelanjutan yang menggabungkan energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi baterai pada kendaraan listrik menjadi semakin penting. Hal ini dapat mendukung upaya menuju akses universal terhadap listrik dengan menurunkan biaya energi terbarukan [48]. Namun, penelitian yang berbeda sepakat bahwa kendaraan listrik memiliki kelemahan terhadap lingkungan [48], [49]. Hal ini terkait dengan penggunaan bahan-bahan yang berbahaya dan mudah terbakar, serta memerlukan energi yang besar untuk membuatnya, sehingga menghasilkan emisi GRK yang besar [50].

Kendaraan listrik dapat menjadi solusi yang tepat untuk masalah iklim jika jaringan listrik terbebas dari karbon, sehingga emisi kendaraan turun secara signifikan. Saat ini banyak negara yang fokus terhadap dekarbonisasi infrastruktur listrik mereka. Dalam beberapa tahun terakhir, perusahaan utilitas di Amerika Serikat telah banyak meninggalkan batubara dan beralih ke bauran energi yang lebih bersih seperti tenaga surya, angin, dan gas alam yang memiliki emisi yang lebih rendah [28].

2.1.3 Kebutuhan Energi Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik baterai atau BEV memang tidak menghasilkan GRK secara langsung, namun seperti perangkat bertenaga listrik lainnya, secara tidak langsung menghasilkan emisi karbon dioksida akibat pembakaran bahan bakar fosil dari pembangkit listrik [51].

Upaya penurunan emisi GRK melalui penggunaan kendaraan listrik harus disertai transformasi energi pembangkit listrik. Untuk jangka pendek pada skenario ambisius penetrasi kendaraan listrik, penurunan emisi GRK mencapai 10 juta ton

CO₂ [15]. Kebutuhan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) diperkirakan terus meningkat hingga 6 kali lipat pada tahun 2030 [2].

2.2 Emisi Transportasi

Indonesia menyumbang sekitar 3,5% emisi GRK global dengan 23% nya berasal dari sektor transportasi sebagai sumber emisi terbesar kedua setelah sektor energi. Dimana 90% transportasi tersebut berupa transportasi jalan. Konsumsi bensin meningkat sebesar 1,2 juta kiloliter per tahun antara tahun 2015-2020, kecuali ketika pandemi melanda pada tahun 2020 [2]. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan berbagai polutan, diantaranya: karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x) yang mencakup nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂), hidrokarbon (HC), senyawa organik yang mudah menguap atau *volatile organic compound* (VOC), partikel berukuran $\leq 10\mu\text{m}$ (PM₁₀), partikel berukuran $\leq 2,5\mu\text{m}$ (PM_{2.5}), dan logam berat timbal (Pb). Paparan gas karbon monoksida dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti sakit kepala, sesak nafas, mata berair, hingga tekanan darah tinggi. Nitrogen oksida dan VOC dari kendaraan merupakan penyebab kabut fotokimia/ *photochemical smog*, sementara karbon monoksida dan partikel dapat masuk dan merusak bronkus, yang selanjutnya menyebabkan asma dan penyakit paru kronik [52]. Sementara itu, PM₁₀ dapat menyebabkan gangguan pernapasan, gangguan kardiovaskular, memicu kanker paru-paru, hingga menyebabkan kematian [53].

Adapun perhitungan emisi transportasi ini dapat dilakukan salah satunya dengan metode *top-down modelling* berdasarkan konsumsi energi dan faktor konversi energi untuk menghitung emisi karbon dari transportasi, yang menghasilkan Persamaan (2.1) dimana E mewakili emisi karbon, i adalah jenis bahan bakar, EF_i adalah faktor emisi karbon untuk bahan bakar i , dan EC_i menunjukkan konsumsi bahan bakar. Metode ini telah banyak digunakan dalam perhitungan emisi lalu lintas [54].

$$E = \sum_i EF_i \times EC_i \quad (2.1)$$

Tabel 2.1 Faktor Emisi Kendaraan untuk Kota Besar di Indonesia

Kategori	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	PM ₁₀ (g/km)	CO ₂ (g/kgBBM)	SO ₂ (g/km)
Sepeda motor	14	5,9	0,29	0,24	3180	0,008
Mobil penumpang (bensin)	40	4	2	0,01	3180	0,026
Mobil penumpang (solar)	2,8	0,2	3,5	0,53	3172	0,44
Bus	11	1,3	11,9	1,4	3172	0,93
Truk	8,4	1,8	17,7	1,4	3172	0,82

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup, 2010

Emisi setiap jenis kendaraan dihitung berdasarkan Persamaan (2.1), sementara jumlah konsumsi energi masing-masing kendaraan yang sesuai dengan bahan bakarnya sesuai dengan Persamaan (2.2) berikut [55].

$$EC_i = \sum (TV_{ij} \times VKT_{ij} \times FE_{jk}) \quad (2.2)$$

dimana

i : tahun ke-

j : jenis kendaraan

k : jenis bahan bakar

EC : konsumsi energi (liter/tahun)

TV : jumlah total kendaraan (unit)

VKT : rata-rata jarak tempuh kendaraan (kilometer/tahun)

FE : konsumsi rata-rata bahan bakar per satuan jarak tempuh (liter/kilometer)

Sementara itu, metode *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) juga kerap digunakan untuk menghitung jumlah emisi kendaraan, dimana hasilnya akan sebanding dengan besarnya energi yang dikonsumsi. Perhitungan emisi karbon dilakukan menggunakan Persamaan (2.3) berikut.

$$Em_i = EC_i \times EmF_k \times EmD_k \quad (2.3)$$

dimana

Em : jumlah emisi (gCO₂/tahun)

EC : konsumsi energi atau bahan bakar (liter/tahun)

EmF : faktor emisi (gCO₂/liter)

EmD : perubahan faktor emisi seiring dengan pertambahan usia kendaraan, dimana bernilai 1 karena diasumsikan penurunan performa mesin akibat pertambahan umur kendaraan sebanding dengan peningkatan kualitas bahan bakar yang juga meningkatkan efisiensi pembakaran.

2.2.1 Proyeksi Transportasi dan Emisi

Terdapat beberapa pendekatan yang dapat digunakan dalam melakukan proyeksi seperti pendekatan *trendline*, pendekatan ekonometrik, pendekatan Delphi, pendekatan *end-use*, pendekatan *time-series*, maupun kombinasi dari beberapa pendekatan tersebut. Pada studi kasus prediksi kebutuhan energi di Kota Semarang oleh Wicaksono [56] pendekatan dilakukan menggunakan metode *trendline*, metode ekonometri, dan metode *end-use*. Berikut merupakan definisi dari beberapa metode pendekatan tersebut:

a. Metode Pendekatan *Trendline*

Metode pendekatan *trendline* melibatkan penggunaan data historis dari periode sebelumnya yang dikumpulkan menjadi satu set data. Setelah itu, data historis tersebut dianalisis dengan membentuk suatu garis ekstrapolasi yang mencerminkan pola dari data historis yang telah digabungkan. Pendekatan ini seringkali digunakan dalam memprediksi pertumbuhan saham perusahaan, proyeksi kebutuhan pasokan dan permintaan suatu komoditas, serta estimasi kebutuhan energi suatu wilayah [57].

Meskipun metode pendekatan *trendline* memiliki beberapa keunggulan, seperti kemudahan aplikasi pemodelan, parameter yang relatif mudah untuk dianalisis, dan minimnya parameter perhitungan yang rumit [58], namun metode ini juga dianggap memiliki akurasi yang rendah. Kelemahan tersebut muncul karena parameter dan perhitungan dalam pendekatan *trendline* cenderung lebih sederhana jika dibandingkan dengan metode lainnya [56].

b. Metode Pendekatan Ekonometri

Metode ini mirip dengan metode pendekatan *trendline*, namun terdapat perbedaan utama yakni adanya penggunaan data yang terkait dengan parameter

keekonomian suatu subjek yang akan dimodelkan [57]. Misalnya pada prediksi kebutuhan energi suatu kota diperlukan data seperti pendapatan per kapita penduduk kota, alokasi dana pemerintah kota, dan berbagai data ekonomi kota yang berkaitan dengan kebutuhan energi. Setelah data tersebut dikumpulkan menjadi satu set data, metode ekonometri kemudian diterapkan untuk menentukan korelasi antar data keekonomian. Selanjutnya, melalui simulasi perhitungan, metode ini akan memberikan estimasi kebutuhan energi kota dari tahun ke tahun. Data estimasi ini dapat dikorelasikan dengan masa depan sehingga memungkinkan dilakukannya peramalan terhadap permintaan energi seperti listrik, gas, dan bahan bakar minyak di kota tersebut [56].

c. Metode Pendekatan *End-Use*

Metode yang juga dikenal sebagai *engineering approach method* [58] ini memiliki keunikan yang membedakannya dari metode-metode sebelumnya dengan keberadaan parameter data seperti total aktivitas dan intensitas. Hal ini membuat metode ini sangat efektif untuk melakukan proyeksi terhadap berbagai hal, salah satu contoh penerapannya adalah dalam proyeksi kebutuhan energi suatu wilayah atau daerah tertentu [57]. Keunggulan kuat dari metode *end-use* sebagai alat proyeksi terletak pada penggunaan perhitungan yang mengandalkan parameter-parameter yang sangat terperinci, namun dengan formula perhitungan yang relatif lebih sederhana jika dibandingkan dengan kedua metode lainnya [56].

2.2.2 Perangkat Lunak LEAP untuk Proyeksi Emisi

Low Emission Analysis Platform (LEAP) adalah sebuah perangkat lunak yang dirancang untuk menganalisis kebijakan energi, perubahan iklim, upaya mitigasi, maupun proyeksi kebutuhan energi berdasarkan data kelistrikan, panas, hingga sektor transportasi. Perangkat yang dikembangkan oleh *Stockholm Environment Institute* ini sudah digunakan oleh berbagai lembaga pemerintah di berbagai negara untuk menganalisis energi dan sudah diunduh oleh lebih dari 5000 pengguna di 169 negara sehingga tergolong sebagai perangkat lunak dengan jumlah pengguna yang sangat banyak. LEAP tidak membayar bagi pengguna di negara-

negara berkembang, namun membayar untuk pengguna dari negara yang tergabung dalam *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD). LEAP biasa digunakan untuk menganalisis sistem energi nasional dari tahun ke tahun hingga proyeksi kebutuhan di masa depan yang tidak terbatas, namun biasanya antara 20 dan 50 tahun. Maka dari itu, perangkat lunak ini cocok digunakan untuk menganalisis skenario jangka panjang, termasuk rencana penerapan sistem EBT hingga 100% [59]. Kemudahan penggunaan LEAP terletak pada algoritmanya yang menggunakan parameter yang relatif sederhana. Hal ini memungkinkan perangkat lunak untuk memodelkan konsumsi energi, mengeksplorasi dan memproduksi sumber energi, serta menjalin korelasi antara energi dan ekonomi. Fitur-fitur LEAP juga melibatkan kemampuan untuk mensimulasikan pengembangan energi terbarukan dan menganalisis tingkat emisi, polutan, serta *short-lived climate pollutants* (SLCP) [56]. LEAP juga menyertakan manajer skenario yang dapat digunakan untuk menggambarkan langkah-langkah kebijakan tertentu. Skenario yang dihasilkan dapat berupa alur yang konsisten tentang bagaimana sistem energi dapat berkembang seiring berjalannya waktu [59].

Proses analisis menggunakan metode pendekatan *trendline*, metode pendekatan ekonometri, dan metode pendekatan *end-use* dapat disimulasikan melalui perangkat lunak ini. LEAP mengadopsi sistem simulasi berbasis model *end-use*, sehingga data esensial yang akan disimulasikan berkaitan dengan pertumbuhan parameter dan intensitas unit *demands* masing-masing [60]. Dalam proses pemodelan LEAP, empat parameter utama digunakan untuk perhitungan dan analisis energi, yaitu: *key assumption parameter*; *demand parameter*; *transmission and distribution parameter*; dan *resources parameter*. Setiap driver parameter ini memiliki peran khusus sebagai berikut [56]:

a. Key Assumption

Parameter ini memiliki peran sentral dalam proses pemodelan dengan LEAP karena menggunakan data yang menjadi dasar perhitungan untuk parameter selanjutnya. Data yang dimasukkan ke dalam *key assumption* mencakup berbagai variabel seperti jumlah penduduk, jumlah rumah, jumlah

kendaraan, dan sebagainya. Meskipun data yang dimasukkan dapat disesuaikan sesuai kebutuhan dan bersifat fleksibel, namun penting untuk memastikan bahwa data yang dimasukkan ke dalam *key assumption* memiliki korelasi yang relevan dengan studi kasus.

b. Demand

Parameter demand berfungsi sebagai pendamping untuk *key assumption*, dimana data yang dimasukkan ke dalam sistem akan dihitung bersamaan dengan *key assumption*. Parameter *demand* mencakup berbagai parameter yang terkait dengan intensitas penggunaan energi di suatu wilayah, level aktivitas energi, dan biaya kebutuhan energi.

c. Transformation and Distribution

Parameter ini berperan dalam mengkalkulasi asal pasokan energi, dimana data dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu energi primer dan sekunder. Sumber energi yang tersedia secara langsung di alam, seperti minyak bumi, gas alam, dan lain-lain. Sementara itu, energi sekunder merupakan hasil olahan dari energi primer, seperti bahan bakar minyak, gas cair, listrik, dan hidrogen. Energi sekunder berperan penting dalam proses distribusi dan konsumsi energi karena bentuknya yang lebih mudah digunakan oleh konsumen, baik untuk kebutuhan rumah tangga, industri, maupun transportasi. Pengelompokan data ini tidak hanya membantu dalam menganalisis sumber daya yang tersedia tetapi juga memungkinkan perencanaan energi yang lebih efektif, termasuk dalam aspek efisiensi, ketahanan pasokan, dan pengurangan emisi karbon.

d. Resources

Parameter ini terdiri dari dua tipe, yaitu energi primer dan energi sekunder, yang otomatis dihasilkan melalui pemodelan data yang dimasukkan dalam parameter *transformation and distribution*. Namun, data tersebut perlu diperinci dengan memasukkan parameter berdasarkan jenis energi yang digunakan. Parameter yang dimasukkan mencakup total sumber daya (seperti minyak bumi, gas alam, dan lainnya) serta potensi energi lainnya.

Penggunaan perangkat lunak LEAP pada studi proyeksi pertumbuhan jumlah transportasi yaitu dengan simulasi terhadap total kendaraan dari tahun ke tahun [56].

2.3 Limbah Baterai dan Pengelolaannya

Baterai yang dibuang menimbulkan ancaman terhadap kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan. Jika baterai terpapar suhu tinggi yang berlebih, atau jika selubung baterai ditembus, baterai akan mengalami arus pendek di bagian dalam. Hubungan arus pendek ini akan menyebabkan apa yang disebut *Joule heating*, yaitu panas yang dihasilkan ketika listrik dialirkan, sementara baterai tidak dapat menghilangkan panas sesegera mungkin. Hal ini akan memicu reaksi kimia yang menghasilkan lebih banyak panas. Proses ini dikenal dengan istilah *thermal runaway* yang dapat memicu terjadinya kebakaran, bahkan ledakan. Meskipun data kebakaran akibat ledakan baterai jarang terjadi, namun jika hal ini terjadi akan menimbulkan kerugian yang besar. Pada kasus kebakaran kendaraan listrik, lebih dari 100 bahan kimia dihasilkan, termasuk beberapa gas yang sangat berbahaya seperti karbon monoksida dan hidrogen sianida—keduanya mematikan bagi manusia dan lingkungan. Air yang tercemar limbah baterai akan menghambat pertumbuhan dan reproduksi organisme air. Selain itu, proses distribusi kendaraan listrik juga akan menyebabkan polusi udara global dan berdampak pada lingkungan. [31].

Kapasitas tipikal baterai sekitar 5-24 kWh untuk HEV dan 18–24 kWh untuk BEV dan perkiraan masa pakai baterai untuk pengguna biasa adalah sekitar sepuluh tahun, dengan penggunaan baterai 40 menit per hari dan 200 pengisian daya tahunan. Baterai jenis Lithium-Ion paling banyak digunakan karena dapat diisi ulang [61]. Daur ulang baterai dapat menjadi salah satu solusi untuk mendapatkan kembali material yang tidak bisa diperbaharui, mengurangi biaya pembuatan baterai baru, meminimalisir resiko ledakan, serta mengurangi biaya pajak pengelolaan limbah [14]. Meskipun penyimpanan energi merupakan sebuah sistem yang kompleks, namun sebagian besar komponennya dapat didaur ulang [28].

Saat ini di Eropa, baterai-baterai yang sudah habis masa pakainya tidak dikumpulkan dan didaur ulang dengan benar, dan hanya 5% litium yang dapat dipulihkan pada tahun 2013 [7], sehingga meningkatkan risiko pelepasan zat berbahaya ke lingkungan dan menimbulkan masalah kesehatan manusia. Diperkirakan pada tahun 2020 terdapat 250.000 ton limbah baterai Li-ion dan tidak ada infrastruktur yang mendukung pengumpulan dan daur ulang limbah tersebut [8]. Kekhawatiran yang sama berlaku terhadap bahan mentah, terutama kobalt, nikel, dan mangan yang juga merupakan bagian penting dari komposisi baterai Li-ion. Daur ulang dapat menawarkan solusi terhadap pasokan bahan yang terbatas dan diperkirakan pada tahun 2040 pasar daur ulang baterai Li-ion global akan bernilai \$31 miliar per tahun [9], karena banyaknya baterai EV yang habis masa pakainya [10]. Terdapat tiga metode daur ulang yang dianggap unggul, yaitu: pemanfaatan dan pemulihan bertahap, pemulihan ultrasonik, dan baterai ion natrium. Metode daur ulang ini dapat memaksimalkan efisiensi penggunaan kembali baterai bekas.

Sementara itu di Indonesia, riset mengenai daur ulang baterai Li-ion sudah dimulai oleh BPPT sejak 2019. PT Indonesia Puqing Recycling Technology di Morowali, Sulawesi Tengah sebagai salah satu perusahaan daur ulang kendaraan listrik saat ini sudah memiliki teknologi daur ulang baterai. Namun, masih terkendala dengan perizinan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dan saat ini Indonesia belum memiliki cukup litium bekas sebagai bahan baku sehingga masih memerlukan izin impor [14]. Industri baterai listrik terintegrasi juga secara resmi mulai dibangun pada pertengahan tahun 2022 di Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB), Kabupaten Batang, Jawa Tengah [62].