

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Penelitian ini membahas berbagai aspek teknis, ekonomi, kebijakan, dan integrasi sistem *Vehicle to Grid (V2G)* dengan jaringan tenaga listrik berbasis *Smart Grid*. Penelitian ini dapat digunakan untuk mendukung kelayakan penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* pada sistem transportasi publik seperti bus listrik Transjakarta. Berikut adalah beberapa penelitian relevan dalam lima tahun terakhir:

Tabel 2.1 Penelitian Relevan

No.	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Temuan Utama
1	Sriram Prabhakara Rao, Tomomewo Stanley Olusegun, dkk. (2025)	<i>Vehicle to Grid technology: Opportunities, challenges, and future prospects for sustainable transportation</i>	Teknologi V2G berperan penting dalam mendukung energi terbarukan, mengurangi emisi, dan menjaga stabilitas jaringan listrik. Meski potensial, tantangan seperti degradasi baterai, komunikasi, dan keamanan siber masih menjadi hambatan. Dukungan kebijakan dan kemajuan teknologi dinilai mampu mendorong penerapan V2G secara luas.
2	Pulkit Kumar, Harpreet Kaur Channi, dkk. (2025)	<i>A comprehensive review of Vehicle to Grid integration in electric vehicles: Powering the future</i>	Teknologi <i>Vehicle to Grid (V2G)</i> berpotensi meningkatkan keberlanjutan dan keandalan jaringan listrik dengan mendukung energi terbarukan, mengurangi emisi, dan menjaga stabilitas sistem. Namun, tantangan seperti degradasi baterai, komunikasi, dan keamanan siber masih perlu diatasi.

			Peluang adopsi luas didukung oleh kebijakan, regulasi, dan tren pasar, sementara studi kasus menunjukkan teknologi baru dapat mengatasi hambatan penerapan skala besar.
3	Chengquan Zhang, Hiroshi Kitamura, Mika Goto-2024	<i>Feasibility of Vehicle to Grid (V2G) implementation in Japan: A regional analysis of the electricity supply and demand adjustment market</i>	Teknologi V2G berperan penting dalam transisi energi bersih, namun potensinya bervariasi antar wilayah. Melalui pemodelan di 47 prefektur Jepang, studi ini menunjukkan bahwa kepemilikan EV menjadi faktor utama penentu potensi V2G. Wilayah seperti Tokyo, Aichi, dan Kanagawa memiliki potensi tinggi, sementara tanpa memperhitungkan EV, daerah seperti Okinawa dan Kagoshima menonjol. Ditemukan juga ketimpangan besar antara pasokan dan permintaan daya, yang menyebabkan sistem V2G sering tidak optimal. Hasil ini menekankan perlunya strategi regional dan model bisnis yang beragam agar pemanfaatan V2G lebih maksimal.
4	Arnoldus Jean Cornelis, Amma Muliya Romadoni (2024)	<i>Analisis Efektivitas Infrastruktur Bangunan Spklu (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) Di Indonesia Menuju</i>	Penelitian ini menilai SPKLU di JABODETABEK dalam mendukung NZE 2060. Fast charging mempercepat pengisian namun mempercepat degradasi baterai, sedangkan medium charging lebih efisien (87-95%). Tantangan meliputi standar konektor, ketergantungan PLN, dan gangguan teknis. Solusi yang disarankan adalah battery swapping, integrasi smart

		<i>Program Nze (Net Zero Emission) Tahun 2060</i>	grid dan energi terbarukan, serta standar nasional. Kolaborasi lintas sektor diperlukan untuk membangun ekosistem kendaraan listrik berkelanjutan.
5	Loso Judijanto, Sulaiman A, Usman Tahir (2024)	<i>The Effect of Smart Grid Implementation on the Integration of New Renewable Energy in Indonesia's Electricity System</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan smart grid dapat meningkatkan integrasi energi terbarukan di Indonesia melalui efisiensi energi, partisipasi konsumen, dan keberlanjutan lingkungan. Namun, adopsinya masih terhambat oleh kesiapan infrastruktur, biaya, dan rendahnya kesadaran konsumen. Dukungan pemerintah, subsidi, dan edukasi publik diperlukan untuk mempercepat implementasi. Konsumen memiliki peran penting dalam pencapaian target energi terbarukan nasional.

2.2 Landasan Teori

Penelitian ini bertujuan untuk menyediakan kerangka teori yang lengkap untuk analisis kelayakan teknis dan ekonomis penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* pada armada bus listrik di wilayah Jakarta. Secara keseluruhan, penelitian ini berfokus pada transformasi yang terjadi dalam sistem tenaga listrik kontemporer ke arah konsep smart grid. Dalam konsep smart grid, kombinasi sumber energi terbarukan, sistem penyimpanan, dan teknologi kendaraan listrik sangat penting untuk mendukung sistem energi yang lebih efisien, konsisten, dan berkelanjutan.

Dalam situasi ini, kendaraan listrik tidak hanya dapat digunakan sebagai cara transportasi yang ramah lingkungan, tetapi juga dapat berfungsi sebagai penyedia daya dinamis. Melalui mekanisme dua arah yang ditawarkan oleh teknologi V2G, energi yang tersimpan dalam baterai kendaraan dapat disalurkan kembali ke jaringan listrik pada saat permintaan daya meningkat atau ketidakseimbangan antara pasokan dan beban sistem.

Dengan demikian, teknologi V2G memungkinkan kendaraan listrik untuk menghasilkan lebih banyak daya daripada kendaraan biasa.

Selain itu, implementasi V2G membutuhkan infrastruktur yang memadai. Infrastruktur ini termasuk model bisnis dan kebijakan yang mendukung, komunikasi cerdas antara jaringan listrik dan kendaraan, sistem pengisian daya dua arah (*bidirectional charging*). Kajian ini juga meninjau proyeksi kebutuhan energi dan transportasi listrik dalam kaitannya dengan target *Net Zero Emission (NZE)* tahun 2060 yang dicanangkan oleh pemerintah Indonesia. Ini dilakukan dalam konteks perencanaan energi nasional. Akibatnya, memahami secara menyeluruh hubungan antara elemen teknis, ekonomis, dan kebijakan energi sangat penting untuk menilai kemungkinan penerapan teknologi V2G sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektor transportasi dan sistem kelistrikan perkotaan di Jakarta.

2.2.1 Sistem Smart Grid dan Karakteristik

Sistem jaringan tenaga listrik modern yang dikenal sebagai *smart grid* memadukan teknologi informasi, otomasi, dan mekanisme pengendalian untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, serta keberlanjutan distribusi energi [1]. Sistem ini dirancang untuk memungkinkan komunikasi dua arah antara konsumen dan penyedia energi, sehingga memungkinkan pengelolaan beban secara dinamis dan pengambilan keputusan berbasis data secara real-time. *Smart grid* juga mampu mengakomodasi sumber energi terbarukan yang bersifat fluktuatif, seperti energi surya dan angin, melalui integrasi teknologi penyimpanan energi dan sistem pengendalian adaptif [2].

Dalam konteks elektrifikasi transportasi dan urbanisasi, penerapan *smart grid* menjadi semakin krusial, khususnya di kota-kota besar seperti Jakarta, yang menghadapi tantangan dalam mengelola beban puncak (*peak load*) yang berpotensi mengganggu stabilitas pasokan listrik. Mekanisme respons permintaan (*demand response*) dan tarif dinamis memungkinkan *smart grid* untuk mengoptimalkan pengelolaan konsumsi energi. Selain itu, integrasi kendaraan listrik memerlukan infrastruktur pengisian daya cerdas yang terhubung secara real-time dengan sistem jaringan [3]. Oleh karena itu, *smart grid* tidak hanya berperan sebagai solusi teknis bagi tantangan kelistrikan perkotaan, tetapi

juga merupakan komponen penting dalam transformasi energi rendah karbon dan pengembangan kota cerdas (*smart city*).

Karakteristik dari system *Smart Grid* antara lain adalah:

1. Integrasi Teknologi Informasi dan Komunikasi

Sistem dilengkapi dengan sensor, *smart meter*, dan perangkat komunikasi canggih yang mampu memantau dan mengendalikan aliran daya secara *real-time*, memungkinkan operator mengetahui beban wilayah dan melakukan manajemen distribusi secara dinamis [4].

2. Interaktif dan Responsif

Smart grid memungkinkan interaksi antara penyedia listrik dan konsumen, di mana pelanggan dapat diberi insentif untuk menyesuaikan pola konsumsi, misalnya mengatur waktu pengisian kendaraan listrik pada jam non-puncak [4].

3. Self-Healing

Smart grid memungkinkan interaksi antara penyedia listrik dan konsumen, di mana pelanggan dapat diberi insentif untuk menyesuaikan pola konsumsi, misalnya mengatur waktu pengisian kendaraan listrik pada jam non-puncak [5].

4. Integrasi Energi Terbarukan dan Penyimpanan Energi

Smart grid dirancang untuk mendukung sumber energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), maupun pembangkit biomassa. Kehadiran penyimpanan energi, baik berupa baterai stasioner maupun baterai kendaraan listrik, membantu menyeimbangkan pasokan dan permintaan energi [5].

5. Efisiensi Energi yang Lebih Tinggi

Pemantauan dan pengendalian yang efektif dapat mengurangi rugi-rugi energi dalam transmisi dan distribusi, serta meningkatkan efisiensi melalui pengelolaan beban puncak dan perencanaan yang lebih optimal [5].

Sebagai pusat ekonomi, pemerintahan, dan transportasi nasional, Jakarta memiliki konsumsi listrik yang sangat tinggi. Permintaan listrik di wilayah ini meningkat signifikan setiap tahun seiring pertumbuhan populasi, aktivitas ekonomi, dan mobilitas perkotaan,

yang menimbulkan tantangan besar bagi penyedia energi dalam menjamin ketersediaan pasokan listrik yang stabil, efisien, dan berkelanjutan.

Penerapan *smart grid* memungkinkan integrasi sistem kelistrikan konvensional dengan teknologi informasi dan komunikasi, sehingga pengelolaan jaringan listrik menjadi lebih cerdas, adaptif, dan efisien. Dengan demikian, teknologi ini menjadi kebutuhan strategis untuk meningkatkan pemanfaatan infrastruktur yang ada, mengurangi kehilangan daya, meningkatkan efisiensi distribusi, serta meningkatkan keandalan pasokan listrik di wilayah perkotaan padat. Selain itu, smart grid juga memungkinkan integrasi sumber energi terbarukan dan kendaraan listrik ke dalam sistem tenaga listrik nasional. Dalam konteks penelitian ini, hal tersebut relevan dengan penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)*, yang menawarkan solusi inovatif untuk mendukung pengelolaan energi berkelanjutan di daerah dengan beban listrik tinggi seperti Jakarta.

2.2.2 Kendaraan Listrik (Electric Vehicle / EV)

Kendaraan listrik merupakan inovasi dalam teknologi transportasi yang menggunakan motor listrik sebagai sumber penggerak utama. *EV* menawarkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, emisi karbon yang jauh lebih rendah, serta potensi penghematan biaya operasional jangka panjang dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar fosil atau *Internal Combustion Engine (ICE)*. Tingkat efisiensi ini terutama disebabkan oleh kemampuan motor listrik dalam mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan kerugian yang lebih rendah dibandingkan proses pembakaran bahan bakar [6].

Perkembangan teknologi penyimpanan energi, khususnya baterai berbasis *lithium-ion*, menjadi faktor kunci yang mendorong adopsi kendaraan listrik di berbagai sektor industri. Kemajuan dalam densitas energi, umur pakai, dan harga baterai meningkatkan daya saing *EV* dibandingkan kendaraan konvensional. Sebagai bagian dari strategi pengurangan emisi karbon di sektor transportasi dan transisi menuju mobilitas berkelanjutan, kendaraan listrik mulai diterapkan tidak hanya pada kendaraan pribadi, tetapi juga pada transportasi publik dan logistik perkotaan. Kendaraan bergerak hanya dengan tenaga baterai tanpa mengaktifkan mesin bensin maupun generator. Motor

penggerak depan dan belakang sepenuhnya mengambil daya dari baterai. Mode ini dipakai untuk perjalanan dalam kota atau kondisi jalan datar [7].

Selain berperan sebagai beban (*load*) pada jaringan listrik, kendaraan listrik juga dapat berfungsi sebagai elemen aktif dalam sistem distribusi energi. Melalui penerapan konsep *Vehicle to Grid (V2G)*, energi yang tersimpan dalam baterai kendaraan dapat dialirkan kembali ke jaringan listrik pada saat permintaan daya meningkat atau terjadi ketidakseimbangan antara pasokan dan beban sistem. Dengan demikian, kendaraan listrik dapat berperan sebagai sumber daya energi terdistribusi (*Distributed Energy Resource, DER*), yang mendukung fleksibilitas, ketahanan, dan stabilitas sistem tenaga listrik [8].

Implementasi teknologi V2G memerlukan infrastruktur dan sistem pengendalian yang canggih, termasuk mekanisme komunikasi dan kontrol dua arah antara kendaraan dan jaringan listrik, perangkat pengisian daya bidirectional, serta algoritma manajemen energi yang memperhitungkan kondisi jaringan, harga listrik, dan kebutuhan operasional kendaraan untuk menentukan waktu optimal pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai. Secara keseluruhan, integrasi kendaraan listrik ke dalam *smart grid* melalui teknologi V2G berpotensi meningkatkan efisiensi energi, ketahanan, dan keberlanjutan sistem tenaga listrik nasional.

2.2.3 Konsep Penyimpanan Energi dan Manajemen Beban dalam Smart Grid

Sistem penyimpanan energi (*Energy Storage System, ESS*) merupakan komponen krusial dalam infrastruktur *Smart Grid*, berperan untuk menjaga keseimbangan dinamis antara pasokan dan permintaan listrik. *ESS* memungkinkan energi yang berlebih saat produksi melebihi konsumsi untuk disimpan, kemudian dialirkan kembali ke jaringan ketika permintaan meningkat. Fungsi ini menjadi semakin penting seiring transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan [9].

Baterai kendaraan listrik termasuk dalam kategori penyimpanan energi bergerak (*mobile energy storage*), berbeda dengan sistem penyimpanan statis karena sifatnya yang fleksibel dan dapat berperan sebagai sumber daya energi terdistribusi (*Distributed Energy Resource, DER*). Dengan demikian, baterai *EV* tidak hanya berfungsi sebagai beban (*load*), tetapi juga dapat mendukung stabilitas dan fleksibilitas sistem tenaga listrik.

Implementasi manajemen beban (*load management*) menjadi strategi utama untuk memaksimalkan pemanfaatan *ESS*. Konsep ini mencakup pengaturan pola konsumsi dan suplai energi agar sesuai dengan kondisi jaringan dan ketersediaan sumber daya. Manajemen beban menjadi sangat penting dalam konteks *Vehicle to Grid (V2G)* untuk memastikan proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai kendaraan tidak mengganggu operasional kendaraan maupun kestabilan sistem.

Pendekatan manajemen beban biasanya memanfaatkan sistem kontrol cerdas dan algoritma prediktif yang mempertimbangkan profil konsumsi energi, status pengisian baterai, harga listrik waktu nyata, dan kondisi jaringan secara keseluruhan. Strategi ini mendukung pencapaian target *Net Zero Emission (NZE)* tahun 2060 melalui integrasi *ESS* dan teknologi *V2G*, dengan meningkatkan efisiensi energi, mengurangi beban puncak (*peak shaving*), dan meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik.

Secara umum, terdapat tiga pendekatan utama dalam strategi manajemen beban yang relevan dengan penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)*, yaitu:

1. Load Leveling

Strategi kendali *load following (LF)* digunakan untuk meningkatkan pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan [10]. Dengan fasilitas pengisian daya dua arah (*bidirectional charger*), energi dari *EV* dapat disalurkan kembali ke jaringan, sehingga mengurangi tekanan pada infrastruktur distribusi dan kapasitas pembangkit. Pendekatan ini membantu menjaga stabilitas profil konsumsi energi dan mencegah lonjakan beban yang dapat menurunkan keandalan system [11].

2. Load Shifting

Load shifting melibatkan penggeseran konsumsi energi, terutama proses pengisian baterai *EV*, dari jam puncak ke jam non-puncak. Pengisian dilakukan saat permintaan energi rendah, misalnya pada malam atau dini hari, sehingga mengurangi risiko kelebihan beban pada jaringan dan memanfaatkan tarif listrik yang lebih rendah. Strategi ini juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan infrastruktur pembangkit dan distribusi tanpa memerlukan investasi tambahan yang signifikan [12].

3. Emergency Support

Strategi ini menekankan penggunaan *EV* sebagai sumber daya cadangan yang dapat diaktifkan saat terjadi gangguan pasokan listrik dari jaringan utama. Energi yang tersimpan dalam baterai dapat digunakan untuk mendukung fasilitas kritis, seperti layanan kesehatan, pusat komunikasi, dan transportasi publik. Dengan mengintegrasikan *EV* ke dalam konsep *microgrid*, sistem tenaga listrik perkotaan menjadi lebih tangguh (*resilient*) [13].

Dalam konteks Jakarta, pola beban puncak terlihat pada dua periode utama, pagi hari (06.00-09.00) dan malam hari (17.00-21.00), yang sebagian besar berasal dari sektor rumah tangga, perkantoran, dan industri ringan. Teknologi V2G memungkinkan energi dari baterai *EV* disalurkan ke jaringan pada saat beban tinggi, sedangkan pengisian baterai dilakukan saat beban rendah. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi pengelolaan daya tanpa perlu membangun kapasitas pembangkit tambahan, sehingga mendukung keberlanjutan finansial dan operasional sistem energi perkotaan.

2.2.4 Vehicle to Grid (V2G)

Teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* memungkinkan kendaraan listrik berinteraksi secara aktif dengan jaringan tenaga listrik melalui mekanisme pertukaran energi dua arah. Sistem ini menggunakan kendaraan tidak hanya sebagai konsumen energi tetapi juga sebagai penyedia daya, yang memiliki kemampuan untuk menyalurkan energi kembali ke jaringan saat permintaan listrik meningkat. Sebaliknya, kendaraan mengisi baterai saat permintaan rendah atau harga energi turun. Oleh karena itu, teknologi V2G menghubungkan sektor transportasi dan sistem kelistrikan, membantu mereka bekerja sama untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan energi.

Secara teknis, penggunaan V2G memiliki banyak keuntungan strategis. Ini termasuk pengurangan beban puncak, peningkatan fleksibilitas operasional jaringan listrik, dan peningkatan ketahanan sistem energi secara keseluruhan. Sistem tenaga listrik dapat memperoleh cadangan daya tambahan untuk mengatasi perubahan permintaan atau ketidakseimbangan pasokan dan beban dengan memanfaatkan kapasitas penyimpanan energi dari armada kendaraan listrik yang besar. Hal ini sangat relevan untuk sistem

tenaga listrik berbasis smart grid, di mana sistem penyimpanan dan pengendalian yang adaptif diperlukan untuk mengintegrasikan sumber daya terbarukan secara berkala.

Teknologi V2G paling efektif diterapkan pada armada kendaraan listrik dengan pola operasi yang konsisten dan terjadwal [14], seperti bus listrik Transjakarta. Dalam operasi transportasi publik, ada waktu tidak aktif, seperti pada malam hari atau jeda antar shift, yang dapat digunakan untuk mengisi daya jaringan. Mekanisme ini memungkinkan baterai bus listrik untuk berfungsi sebagai sumber daya energi terdistribusi (*DER*) yang membantu menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi jaringan listrik.

Skema V2G memberikan keuntungan teknis bagi sistem tenaga listrik serta keuntungan ekonomi bagi operator transportasi. Ada kemungkinan bahwa energi yang dikembalikan ke jaringan akan dikompensasi melalui skema insentif energi, program respons terhadap permintaan, atau berpartisipasi dalam pasar listrik terdistribusi. Keuntungan ini dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan aset energi sekaligus menurunkan biaya operasional armada.

Namun demikian, keberhasilan penerapan V2G sangat bergantung pada sejumlah faktor pendukung. Ini termasuk infrastruktur pengisian daya dua arah yang tersedia, regulasi tarif listrik yang fleksibel dan adaptif, dan integrasi sistem dengan platform manajemen energi berbasis data [15]. Selain itu, untuk menjamin keamanan, keandalan, dan efisiensi proses pertukaran energi, standar komunikasi dan *interoperabilitas* harus diterapkan antara operator jaringan listrik, stasiun pengisian kendaraan, dan kendaraan.

Implementasi V2G pada armada bus listrik dapat menjadi salah satu strategi yang efektif untuk mendukung optimalisasi smart grid, efisiensi energi, dan pencapaian target *Net Zero Emission (NZE)* karena pola permintaan energi yang dinamis dan beban sistem kelistrikan perkotaan seperti Jakarta.

2.2.4.1. Prinsip kerja V2G

1. Proses Grid to Vehicle (G2V)

Proses *Grid to Vehicle (G2V)* mengalirkan energi dari jaringan listrik ke baterai kendaraan listrik. Dalam kondisi operasi normal, EV memanfaatkan daya dari sistem kelistrikan untuk mengisi ulang kapasitas baterai. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan kapasitas jaringan dan menghindari peningkatan

beban puncak (*peak load*), pengisian baterai biasanya dilakukan pada periode beban rendah (*off-peak period*) [16]. Strategi ini juga memungkinkan penggunaan lebih besar dari energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi karbon. Dengan demikian, G2V merupakan komponen penting dalam integrasi kendaraan listrik ke dalam smart grid.

2. Mekanisme Vehicle to Grid (V2G)

Mekanisme *Vehicle to Grid (V2G)* merupakan proses sebaliknya dari G2V, di mana kendaraan listrik yang terhubung ke jaringan dapat menyalurkan energi kembali ke sistem tenaga listrik. Proses ini biasanya dilakukan saat permintaan energi meningkat (*peak load*) atau saat pasokan dari pembangkit tidak mencukupi. Melalui V2G, kendaraan listrik berperan sebagai sumber daya energi terdistribusi (*Distributed Energy Resource, DER*) yang dapat menjaga kestabilan frekuensi, meningkatkan keandalan sistem, dan mengurangi kebutuhan pembangkit puncak. Selain manfaat teknis, skema ini juga dapat memberikan insentif finansial bagi pemilik EV melalui program kompensasi energi yang dikembalikan ke jaringan atau mekanisme partisipasi dalam pasar energi.

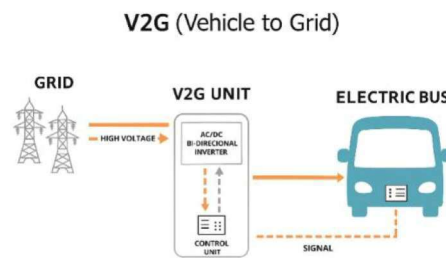
3. Sistem Manajemen Energi (EMS)

Energy Management System (EMS) adalah perangkat lunak cerdas yang mengatur waktu dan besaran proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai kendaraan. EMS mempertimbangkan faktor-faktor seperti kondisi jaringan listrik, status baterai kendaraan, tingkat pengisian saat ini, serta preferensi pemilik atau operator kendaraan. Sistem ini menggunakan algoritma optimasi dan analisis data untuk menentukan strategi operasi yang paling efisien, meminimalkan biaya energi, dan menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Secara lebih luas, EMS berfungsi sebagai penghubung antara operator jaringan, infrastruktur pengisian daya, dan kendaraan listrik, sehingga menjamin koordinasi yang optimal dalam ekosistem V2G [17].

4. Sistem Komunikasi yang Andal

Ketersediaan sistem komunikasi yang handal menjadi prasyarat penting untuk mendukung pertukaran data real-time antara kendaraan listrik, stasiun pengisian

daya, dan operator jaringan. Infrastruktur komunikasi ini melibatkan penerapan protokol standar internasional, seperti *Open Charge Point Protocol (OCPP)* untuk komunikasi antara pengisi daya dan EMS, serta IEC 61850 untuk integrasi dengan sistem otomasi jaringan listrik. Dengan jaringan komunikasi yang terstandarisasi, sistem V2G dapat melakukan pengendalian, pemantauan, dan koordinasi operasi secara simultan dengan tingkat keamanan dan *interoperabilitas* yang tinggi [18].



Gambar 2.1 Prinsip Kerja V2G

2.2.4.2 Komponen penting dalam V2G

Secara umum, terdapat tiga komponen utama yang berperan penting dalam ekosistem V2G, yaitu:

1. Kendaraan Listrik (*EV*)

Sebagai media penyimpanan energi bergerak (*mobile energy storage*), kendaraan listrik merupakan komponen inti dalam sistem V2G. Agar dapat berpartisipasi secara efektif, EV harus dilengkapi dengan baterai yang mampu mengisi dan mengeluarkan daya secara berulang tanpa menurunkan kapasitas atau umur pakai. Baterai lithium-ion menjadi standar saat ini karena memiliki densitas energi tinggi, efisiensi konversi yang baik, dan stabilitas termal yang mendukung operasi dua arah [19]. Sistem manajemen baterai (*Battery Management System, BMS*) memantau kondisi baterai, menjaga keseimbangan sel, dan melindungi komponen dari arus atau suhu berlebih selama proses *Grid-to-Vehicle (G2V)* maupun V2G.

2. Charger Dua Arah (*Bidirectional Charger/Inverter*)

Perangkat ini memungkinkan aliran daya dua arah antara jaringan listrik dan kendaraan listrik. Selain mengonversi arus searah (DC) yang tersimpan dalam

baterai menjadi arus bolak-balik (AC) sesuai spesifikasi jaringan, inverter juga mengatur waktu dan besaran aliran energi berdasarkan kondisi jaringan dan instruksi dari *Energy Management System (EMS)* [20]. Dengan demikian, perangkat ini berperan sebagai penghubung fisik dan pengendali operasi yang menentukan keamanan serta efisiensi sistem V2G.

3. Infrastruktur Komunikasi

Infrastruktur komunikasi memastikan koordinasi dan sinkronisasi antar-komponen V2G. Sistem ini memungkinkan pertukaran data secara *real-time* antara kendaraan, stasiun pengisian daya, dan operator jaringan. Penerapan protokol standar internasional, seperti *Open Charge Point Protocol (OCPP)* untuk komunikasi antara stasiun pengisian dan EMS, serta IEC 61850 untuk integrasi dengan otomasi jaringan listrik, memastikan keamanan, *interoperabilitas*, dan efisiensi operasional sistem. Dengan jaringan komunikasi yang andal, V2G dapat memantau status kendaraan, mengontrol proses pengisian dan pengosongan, serta menyesuaikan operasi sesuai kondisi jaringan.

2.2.4.3 Manfaat V2G

Manfaat penerapan V2G dapat dikategorikan ke dalam tiga kelompok utama, yaitu:

1. Manfaat bagi Jaringan Listrik:

Implementasi V2G memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik.

a. Pengurangan Beban Puncak dan Peningkatan Faktor Kapasitas Pembangkit

V2G memanfaatkan energi yang tersimpan dalam baterai kendaraan untuk menyuplai daya pada periode beban puncak, sehingga menyeimbangkan profil permintaan energi dan mengurangi tekanan pada infrastruktur pembangkit dan distribusi. Hal ini meningkatkan faktor kapasitas pembangkit serta optimalisasi operasi sistem tenaga.

b. Penyediaan Layanan *Ancillary*

Armada EV dapat menyediakan layanan pendukung sistem (*ancillary services*), seperti pengaturan frekuensi (*frequency regulation*) dan dukungan

tegangan (*voltage support*), yang penting untuk menjaga kestabilan dan kualitas daya pada jaringan listrik [21].

c. Dukungan Integrasi Energi Terbarukan

V2G memungkinkan energi dari sumber terbarukan yang bersifat intermiten, seperti tenaga surya dan angin, disimpan dalam baterai kendaraan saat produksi tinggi, kemudian dialirkan kembali saat produksi rendah. Pendekatan ini meningkatkan fleksibilitas sistem dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar fosil.

2. Manfaat bagi Pemilik Kendaraan

Dari sisi pengguna, teknologi V2G menawarkan potensi keuntungan ekonomi serta efisiensi biaya operasional

a. Kompensasi Finansial

Pemilik EV dapat memperoleh pendapatan tambahan melalui program kompensasi atau partisipasi dalam pasar energi dengan menjual kembali energi yang tersimpan ke jaringan listrik.

b. Pemanfaatan Harga Listrik Dinamis

Dalam sistem tarif waktu nyata (*real-time pricing*), pengguna dapat mengisi baterai saat harga rendah (*off-peak*) dan menyalurkan energi kembali saat harga tinggi, sehingga mengoptimalkan biaya energi dan mendorong perilaku konsumsi yang lebih efisien.

3. Bagi Lingkungan

Penerapan teknologi V2G juga memiliki dampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan transisi menuju energi bersih

a. Pengurangan Ketergantungan pada Pembangkit Fosil

V2G membantu mengurangi kebutuhan akan pembangkit fosil, khususnya pada beban puncak, dengan menyediakan cadangan energi tambahan dan menyeimbangkan pasokan energi terbarukan.

b. Mendorong Penetrasi Energi Terbarukan dan Penurunan Emisi Karbon

Integrasi V2G dengan smart grid mempercepat penggunaan sumber energi terbarukan, sehingga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca.

Dengan demikian, penerapan V2G menjadi strategi penting dalam mendukung pencapaian target *Net Zero Emission (NZE)* 2060 di Indonesia.

2.2.5 Infrastruktur Pendukung V2G

Penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* memerlukan infrastruktur yang kompleks, terintegrasi, dan memiliki kemampuan interoperabilitas tinggi antara kendaraan listrik, jaringan distribusi tenaga listrik, serta sistem manajemen energi (*Energy Management System, EMS*). Keberhasilan implementasi V2G sangat bergantung pada kesiapan komponen teknis, sistem komunikasi, serta pengelolaan data dan energi yang cerdas.

2.2.5.1 Infrastruktur Pengisian Daya

Infrastruktur pengisian daya merupakan elemen fundamental dalam penerapan V2G. Berbeda dengan stasiun pengisian konvensional yang hanya mendukung pengisian satu arah (*unidirectional charging* atau *Grid to Vehicle, G2V*), sistem V2G memerlukan stasiun pengisian dua arah (*bidirectional charging*), yang memungkinkan energi dari baterai kendaraan dialirkan kembali ke jaringan saat dibutuhkan.

1. Stasiun Pengisian Daya Dua Arah

Stasiun pengisian ini dilengkapi perangkat keras dan perangkat lunak yang memungkinkan pengisian dan pengosongan daya secara aman dan terkendali. Stasiun V2G harus memenuhi standar internasional seperti protokol *CHAdemo*, *ISO/IEC 15118*, dan *OCPP (Open Charge Point Protocol)*, yang mengatur mekanisme komunikasi, keamanan transfer daya, dan sinkronisasi arus antara kendaraan dan jaringan listrik [22][23].

2. Sistem Komunikasi dan Kendali

Sistem komunikasi dan kendali memastikan koordinasi *real-time* antara kendaraan listrik, stasiun pengisian, dan operator jaringan. Infrastruktur ini meliputi smart meters, unit pengontrol lokal, dan platform agregator yang berfungsi sebagai *virtual power plant*. Sistem ini memungkinkan operator memantau status pengisian, kapasitas baterai, dan kondisi jaringan secara simultan untuk membuat keputusan pengisian atau pengosongan energi yang optimal.

3. Jaringan Distribusi Cerdas (*Smart Distribution Network*)

Jaringan distribusi listrik harus mampu menyesuaikan beban dan suplai energi secara dinamis. Jaringan cerdas dilengkapi sensor, aktuator, sistem kendali otomatis, dan *advanced metering infrastructure (AMI)* yang terintegrasi secara digital. Sistem ini memungkinkan pemantauan, pengaturan tegangan, dan pengendalian arus daya untuk mendukung stabilitas jaringan saat ribuan kendaraan listrik berinteraksi secara bersamaan.

4. Integrasi Sistem Manajemen Energi dan Peramalan Beban

Perangkat lunak EMS mengoptimalkan jadwal pengisian dan pengosongan baterai berdasarkan kondisi jaringan, harga listrik, dan pola permintaan energi. Algoritma prediksi beban menganalisis data historis untuk menyesuaikan operasi secara proaktif. Teknologi *demand response* digunakan untuk menyesuaikan konsumsi daya kendaraan secara otomatis sesuai kondisi jaringan, meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi risiko ketidakseimbangan beban.

Di Jakarta, infrastruktur pendukung V2G masih terbatas, namun terdapat potensi untuk pengembangan, terutama pada lokasi strategis seperti pool bus listrik Transjakarta, yang sudah memiliki sistem pengisian dan fasilitas penyimpanan armada dasar. Dukungan kebijakan pemerintah, peningkatan kapasitas SPKLU, dan integrasi dengan *smart grid* dapat mendorong penerapan V2G secara optimal.

2.2.6 Integrasi V2G pada Jaringan Distribusi

Integrasi V2G ke dalam jaringan distribusi merupakan langkah strategis untuk mentransformasi sistem tenaga listrik konvensional menjadi lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan. Pada sistem konvensional, aliran daya bersifat satu arah dari pembangkit ke konsumen. Dengan V2G, muncul paradigma aliran daya dua arah, di mana EV berperan sebagai beban (*load*), sumber daya terdistribusi (*distributed generation*), dan media penyimpanan energi (*energy storage system*).

Penerapan V2G memerlukan analisis teknis menyeluruh, dengan mempertimbangkan profil beban, kapasitas trafo dan *feeder*, serta standar kualitas daya.

1. Profil Beban Harian dan Musiman

Pola beban distribusi bervariasi secara harian dan musiman. Di Jakarta, beban puncak terjadi antara pukul 17.00–21.00, dipengaruhi penggunaan AC, penerangan, dan aktivitas industri serta komersial. V2G memungkinkan load shifting dan peak shaving: kendaraan mengisi daya saat beban rendah (*off-peak*) dan menyalurkan energi kembali saat beban puncak. Strategi ini meratakan profil beban, mengurangi tekanan pada pembangkit konvensional, dan meningkatkan efisiensi sistem.

2. Kapasitas Trafo dan *Feeder*

Kapasitas trafo dan feeder distribusi menentukan sejauh mana V2G dapat diintegrasikan tanpa menurunkan keandalan sistem. Lonjakan arus akibat pengisian serentak dapat menyebabkan *overloading*, namun energi dari baterai EV juga dapat digunakan untuk memenuhi sebagian kebutuhan daya di tingkat distribusi, sehingga arus dari jaringan utama berkurang. Dampak positif meliputi pengurangan rugi daya, peningkatan efisiensi distribusi, dan penghematan biaya operasional.

3. Standar Kualitas Daya

Integrasi V2G juga menimbulkan tantangan terhadap kualitas daya (*power quality*) di jaringan distribusi. Aktivitas pengisian dan pengosongan energi dalam skala besar dapat memengaruhi parameter-parameter kelistrikan utama, seperti:

a. Tegangan

Fluktuasi arus dua arah dapat menyebabkan *overvoltage*, sehingga pengaturan tegangan menjadi penting.

b. Frekuensi

Perubahan daya cepat berpotensi memengaruhi stabilitas frekuensi; V2G dapat dimanfaatkan untuk *frequency regulation*.

c. Harmonisa

Penggunaan *bidirectional chargers* berbasis elektronika daya dapat menimbulkan distorsi harmonisa. Penerapan filter, desain power electronics sesuai standar, dan *total harmonic distortion (THD)* di bawah ambang batas (misalnya IEEE 519) diperlukan untuk menjaga kualitas daya.

2.2.7 Integrasi V2G dalam Smart Grid

Integrasi teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* ke dalam sistem *Smart Grid* merupakan inovasi transformasional dalam sektor energi dan transportasi modern. Konsep ini mengubah peran kendaraan listrik (EV) dari sekadar beban pasif menjadi sumber daya aktif yang dapat menyediakan energi secara terdistribusi kepada jaringan listrik. Dengan penerapan V2G, EV tidak hanya berfungsi sebagai sarana transportasi, tetapi juga sebagai unit penyimpanan energi bergerak (*mobile energy storage*) yang dapat dioptimalkan untuk mendukung stabilitas, fleksibilitas, dan efisiensi sistem tenaga listrik [24].

Implementasi V2G dalam kerangka Smart Grid memerlukan koordinasi multidimensi, mencakup aspek teknis, operasional, ekonomi, serta kebijakan dan regulasi. Fokus utama pada aspek teknis adalah memastikan aliran energi dua arah antara EV dan jaringan distribusi berlangsung aman, efisien, dan andal, tanpa mengganggu kebutuhan mobilitas pengguna.

Terdapat beberapa aspek utama yang menjadi kunci keberhasilan dalam integrasi V2G ke dalam sistem *Smart Grid*, yaitu sebagai berikut:

1. Mekanisme Harga Dinamis (*Dynamic Price Signaling*)

Salah satu komponen kunci dalam integrasi V2G adalah mekanisme harga listrik yang dinamis, yang mencerminkan kondisi aktual jaringan, baik dari sisi ketersediaan pasokan maupun permintaan energi. Saat harga listrik meningkat akibat beban puncak (*peak load*), sistem V2G dapat memberikan insentif ekonomi bagi pemilik EV untuk menyalurkan energi kembali ke jaringan (*discharging*).

Skema harga seperti *time-of-use pricing* atau *demand-based pricing* memungkinkan pengguna mengisi baterai saat harga rendah (misalnya pada malam hari) dan menjual kembali energi saat harga tinggi. Mekanisme ini tidak hanya memberikan keuntungan finansial bagi pengguna, tetapi juga mengurangi tekanan pada jaringan listrik dan menekan kebutuhan investasi pada pembangkit puncak (*peaking power plants*), sehingga meningkatkan efisiensi ekonomi dan operasional sistem tenaga listrik [25].

2. Algoritma Optimasi Manajemen Energi

Aspek penting berikutnya adalah penerapan algoritma manajemen energi cerdas yang mengoptimalkan waktu dan jumlah energi yang dialirkan selama

proses charging dan discharging. Algoritma ini mempertimbangkan parameter seperti jadwal penggunaan kendaraan, kondisi baterai, status jaringan, dan tren harga energi.

Dengan sistem kontrol berbasis optimasi, daya dari baterai EV dapat disuplai ke jaringan hanya pada waktu yang paling efisien, baik dari sisi teknis maupun ekonomi, tanpa mengganggu kebutuhan mobilitas pengguna.

Berbagai pendekatan optimasi telah dikembangkan, antara lain:

- a. *Rule-based logic*, untuk sistem sederhana dengan aturan tetap [26].
- b. *Linear programming*, untuk mencari keseimbangan optimal antara konsumsi dan suplai daya [27].
- c. *Machine learning*, yang mampu memprediksi pola beban dan perilaku pengguna untuk pengambilan keputusan yang adaptif [28].

Penerapan algoritma ini memungkinkan integrasi adaptif dan otomatis antara EV dan *Smart Grid* secara *real-time*, mendukung efisiensi energi dan kestabilan sistem secara keseluruhan.

3. Standarisasi Komunikasi dan Protokol Teknis

Keberhasilan V2G sangat bergantung pada *interoperabilitas* dan standar komunikasi antarperangkat. Standar internasional seperti ISO/IEC 15118 menjadi acuan utama dalam komunikasi dua arah antara EV dan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Protokol ini mencakup fitur *Plug & Charge*, identifikasi dan otorisasi pengguna, manajemen transaksi energi, serta pengaturan aliran daya yang aman dan efisien.

Selain ISO/IEC 15118, protokol lain seperti *OCPP (Open Charge Point Protocol)* dan IEC 61850 digunakan untuk integrasi dengan operator jaringan listrik (*grid operator*). Di tingkat nasional, dukungan regulasi diperlukan untuk menjamin keselamatan instalasi listrik, kualitas daya, dan mekanisme tarif yang adil bagi pengguna dan operator. Kombinasi standar teknis global dan regulasi lokal menjadi kunci keberhasilan, keandalan, dan skalabilitas sistem V2G di Indonesia.

2.2.8 Standar dan Regulasi

Implementasi teknologi Vehicle to Grid (V2G) tidak hanya bergantung pada kesiapan aspek teknis dan infrastruktur, tetapi juga sangat ditentukan oleh kerangka regulasi, kebijakan nasional, serta standar teknis yang mengatur sektor ketenagalistrikan. Keberadaan kebijakan yang mendukung menjadi faktor krusial dalam menciptakan lingkungan yang kondusif bagi adopsi teknologi inovatif seperti V2G, terutama dalam konteks transisi energi menuju sistem yang lebih berkelanjutan.

Di Indonesia, komitmen terhadap pengembangan energi bersih dan efisiensi sistem tenaga listrik telah diatur melalui berbagai kebijakan strategis. Beberapa regulasi utama yang relevan dengan integrasi V2G antara lain Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019, serta standar teknis dan pedoman operasional PLN.

1. Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)

RUEN, sebagaimana diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017, merupakan dokumen strategis yang mengarahkan kebijakan energi nasional hingga tahun 2050. Salah satu target utama RUEN adalah peningkatan porsi Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada 2025 dan 31% pada 2050 terhadap total bauran energi nasional.

Untuk mencapai target tersebut, diperlukan pengembangan infrastruktur yang mampu menampung karakteristik intermiten dari sumber energi terbarukan seperti PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu), dan biomassa. Dalam konteks ini, V2G berperan sebagai mekanisme penyimpanan energi sementara (*intermediate energy storage*), di mana kelebihan energi dari sumber EBT dapat disimpan dalam baterai kendaraan listrik dan disalurkan kembali ke jaringan saat terjadi beban puncak.

RUEN juga menekankan pentingnya pembangunan jaringan listrik cerdas sebagai elemen kunci dalam mendukung integrasi sumber energi terdesentralisasi dan sistem penyimpanan seperti V2G. Dengan demikian, V2G menjadi bagian integral dari strategi nasional menuju sistem energi yang efisien, adaptif, dan rendah emisi.

2. Perpres No. 55 Tahun 2019

Peraturan Presiden ini menandai komitmen pemerintah Indonesia dalam mempercepat adopsi kendaraan listrik berbasis baterai (*Battery Electric Vehicle/BEV*) dan membangun ekosistem pendukungnya. Beberapa pasal memiliki relevansi langsung terhadap penerapan V2G, antara lain:

a. Penyediaan Infrastruktur Pengisian Daya

Pemerintah mendorong pembangunan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) di berbagai wilayah dengan mengacu pada standar teknis Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Dalam konteks V2G, pengembangan SPKLU yang mendukung fungsi dua arah (*bidirectional charging*) menjadi langkah penting untuk memungkinkan interaksi energi antara kendaraan dan jaringan listrik.

Dalam kondisi pengisian cepat, penting untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan baterai untuk terisi penuh pada berbagai nilai arus pengisian, sehingga proses pengisian dapat berlangsung dalam durasi yang lebih singkat. Arus pengisian menjadi variabel pengujian untuk melihat pengaruhnya terhadap lama pengisian dan umur baterai. Umur baterai sendiri menggambarkan jumlah siklus isi–buang yang dapat dijalani sebelum kapasitasnya turun ke tingkat yang tidak lagi dapat diterima [29].

b. Insentif Fiskal dan Nonfiskal

Regulasi ini memberikan dukungan berupa keringanan pajak, pembebasan bea masuk, serta fasilitasi riset dan pengembangan teknologi. Kebijakan ini mempercepat pengembangan teknologi *bidirectional charger* dan sistem komunikasi pintar yang menjadi tulang punggung implementasi V2G.

c. Pengembangan Ekosistem Industri dan Kolaborasi Multipihak

Pemerintah mendorong keterlibatan sektor swasta, BUMN, dan lembaga penelitian dalam membangun rantai pasok industri kendaraan listrik, termasuk teknologi penyimpanan energi dan sistem kontrol V2G. Kolaborasi lintas sektor ini menjadi kunci dalam membangun integrasi teknologi yang berkelanjutan dan kompatibel dengan sistem kelistrikan nasional.

3. Standar Teknis dan Pedoman PLN

Implementasi V2G juga membutuhkan kepatuhan terhadap standar teknis nasional dan pedoman operasional PLN:

a. SNI (Standar Nasional Indonesia)

SNI menetapkan standar proteksi, efisiensi, dan kualitas daya, termasuk ketentuan mengenai inverter, sistem proteksi hubung singkat, dan pengendalian harmonisa. Penerapan standar ini memastikan operasi V2G tidak mengganggu kestabilan jaringan.

b. Pedoman Interkoneksi PLN

Dokumen ini memuat ketentuan teknis terkait batas tegangan, kapasitas sambungan, proteksi jaringan, dan persyaratan anti-islanding bagi semua sumber daya terdistribusi, termasuk sistem V2G. Kepatuhan terhadap pedoman ini menjamin energi yang dikembalikan ke jaringan berada dalam parameter aman dan sesuai standar operasional.

c. Standar Komunikasi dan Sistem Kendali

Pemerintah mendorong keterlibatan sektor swasta, BUMN, dan lembaga penelitian dalam membangun rantai pasok industri kendaraan listrik, termasuk teknologi penyimpanan energi dan sistem kontrol V2G. Kolaborasi lintas sektor ini menjadi kunci dalam membangun integrasi teknologi yang berkelanjutan dan kompatibel dengan sistem kelistrikan nasional.

2.2.9 Dampak dan Keberlanjutan

Integrasi teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* memberikan dampak multifaset terhadap sistem tenaga listrik, lingkungan, ekonomi, dan masyarakat. Sebagai bagian dari ekosistem smart grid, V2G berfungsi ganda: sebagai penyedia fleksibilitas energi melalui pelepasan daya dari baterai kendaraan ke jaringan, serta sebagai katalis percepatan elektrifikasi transportasi.

2.2.9.1 Dampak Lingkungan

Dari perspektif lingkungan, penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* memiliki potensi signifikan dalam mendukung dekarbonisasi sistem energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Berdasarkan *Life Cycle Assessment (LCA)* sesuai

ISO 14040:2016, emisi total yang dihasilkan oleh kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) secara signifikan lebih rendah dibandingkan kendaraan konvensional, terutama jika energi listrik yang digunakan berasal dari sumber terbarukan [30].

Dalam sistem kelistrikan konvensional, peningkatan permintaan energi pada periode beban puncak biasanya dipenuhi melalui pembangkit tambahan berbasis batu bara atau diesel, yang memiliki efisiensi rendah dan menghasilkan emisi tinggi. Dengan integrasi V2G, energi yang tersimpan dalam baterai kendaraan listrik dapat dimanfaatkan untuk menggantikan kebutuhan energi dari pembangkit puncak (*peaking plants*). Hal ini mengurangi operasi pembangkit berbasis fosil secara langsung, sehingga menurunkan emisi karbon dioksida (CO_2) serta polutan lokal seperti nitrogen oksida (NO_x) dan partikel halus ($PM_{2.5}$), yang merupakan kontributor utama pencemaran udara di wilayah perkotaan [31].

Dengan demikian, penerapan V2G tidak hanya meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem tenaga listrik, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap pencapaian target keberlanjutan lingkungan dan pengurangan dampak negatif sektor transportasi perkotaan.

2.2.9.2 Dampak terhadap Efisiensi Energi dan Infrastruktur

Secara sistemik, teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* memiliki kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi nasional dan mengoptimalkan pemanfaatan infrastruktur kelistrikan. Dengan memanfaatkan prinsip *distributed energy storage*, energi listrik dapat disimpan dalam baterai kendaraan dan digunakan kembali secara lokal. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi kerugian transmisi tetapi juga meningkatkan stabilitas jaringan, terutama pada saat terjadi fluktuasi permintaan.

Dalam perspektif *Smart Grid Integration Theory*, sistem V2G mengubah kendaraan listrik dari entitas pasif menjadi komponen aktif dalam jaringan energi pintar. Kendaraan listrik yang terintegrasi dapat mendukung fungsi load balancing, frequency regulation, dan voltage control. Dengan adanya kapasitas penyimpanan energi yang terdistribusi pada ribuan kendaraan, sistem kelistrikan menjadi lebih tangguh terhadap gangguan dan perubahan beban, meningkatkan keandalan operasional jaringan[32]. Dari sisi ekonomi, V2G berpotensi mengurangi kebutuhan investasi besar pada pembangunan pembangkit

listrik dan jaringan distribusi baru. Menurut *Green Investment Theory*, integrasi teknologi efisien seperti V2G menghasilkan nilai tambah ekonomi jangka panjang dengan menekan biaya eksternal yang terkait polusi, kesehatan, dan konsumsi bahan bakar fosil[33][34].

2.2.9.3 Dampak Sosial Pemberdayaan Konsumen Energi

Secara sosial, penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* menandai pergeseran paradigma dari sistem energi tersentralisasi menuju sistem yang lebih partisipatif dan demokratis. Konsep prosumer, yang menggabungkan peran producer dan consumer, menjadi relevan dalam konteks ini. Pemilik kendaraan listrik tidak hanya berperan sebagai konsumen energi, tetapi juga dapat menyuplai energi kembali ke jaringan, sehingga berkontribusi aktif terhadap pengelolaan sistem tenaga listrik.

Melalui mekanisme kompensasi dan insentif, seperti program *demand response* atau *energy credit*, pengguna memperoleh manfaat ekonomi langsung atas partisipasinya dalam sistem V2G. Pendekatan ini sejalan dengan teori *Technology Adoption*, yang menyatakan bahwa keberhasilan implementasi teknologi baru sangat bergantung pada persepsi pengguna terkait manfaat dan kemudahan penggunaan [35].

2.2.9.4 Strategi Keberlanjutan Jangka Panjang

Secara keseluruhan, penerapan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)* merupakan bagian integral dari strategi transisi energi berkelanjutan menuju sistem kelistrikan yang cerdas (smart grid), efisien, dan rendah emisi. Teknologi ini berperan sebagai penghubung antara sektor transportasi dan energi dalam satu ekosistem terintegrasi, memungkinkan adaptasi yang responsif terhadap fluktuasi permintaan listrik dan penetrasi energi terbarukan. Sektor transportasi merupakan salah satu pengguna energi terbesar, berdampingan dengan sektor industri. Karena itu, langkah-langkah konservasi energi di sektor transportasi memiliki peranan penting dalam mendukung pencapaian target penghematan energi yang telah ditetapkan dalam KEN dan RUEN [36].

Dalam perspektif jangka panjang, teori *Sustainable Energy Transition* menekankan bahwa keberlanjutan sistem energi tidak hanya ditentukan oleh inovasi teknologi semata, tetapi juga oleh sinergi kebijakan lintas sektor, struktur insentif yang tepat, serta kesadaran dan partisipasi sosial. Implementasi V2G di Jakarta merupakan contoh konkret

dari *socio-technical transition*, di mana transformasi sistem energi berjalan seiring dengan perubahan perilaku masyarakat dan pengembangan kebijakan publik [37].

Di negara berkembang, ICEV tetap dominan karena biaya yang lebih rendah dan infrastruktur yang sudah tersedia, meski berdampak lingkungan lebih besar. Adopsi EV memberikan peluang beralih ke teknologi yang lebih bersih, dan keberhasilan transisinya sangat dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah, dukungan internasional, serta investasi swasta [38].

2.2.10 Transisi Energi dan Dekarbonisasi

2.2.10.1 Konsep Dasar Transisi Energi

Transisi energi merupakan proses perubahan sistemik dari ketergantungan pada bahan bakar fosil menuju sistem energi rendah karbon dan berkelanjutan. Proses ini bersifat multidimensional, mencakup dimensi teknologi, sosial, ekonomi, dan kelembagaan yang saling berinteraksi. Transisi energi menekankan penggantian sumber energi primer, adopsi teknologi efisien, serta restrukturisasi tata kelola energi secara bertahap dan terintegrasi.

Secara global, transisi energi menjadi bagian dari komitmen Paris Agreement yang menargetkan pembatasan kenaikan suhu global di bawah 2°C [39]. Tiga pilar utama transisi energi meliputi:

1. Dekarbonisasi sistem energi melalui peningkatan porsi energi terbarukan.
2. Elektrifikasi sektor pengguna akhir (transportasi, industri, rumah tangga).
3. Integrasi sistem energi cerdas melalui digitalisasi dan desentralisasi.

Teori Energy Transition Framework menekankan bahwa keberhasilan transisi energi tidak hanya bergantung pada inovasi teknologi, tetapi juga pada dukungan kebijakan, mekanisme pembiayaan hijau, dan kesiapan sosial. Di Indonesia, kebijakan ini diterjemahkan melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan *Grand Strategy Energi Nasional (GSEN)*, dengan target bauran energi terbarukan mencapai 31% pada tahun 2050 dan pencapaian *Net Zero Emission (NZE)* pada 2060.

2.2.10.2 Dekarbonisasi Sistem Energi

Dekarbonisasi sistem energi merupakan upaya menurunkan intensitas karbon per satuan energi melalui kombinasi efisiensi energi, peningkatan pemanfaatan energi

terbarukan, dan elektrifikasi transportasi. Berdasarkan laporan *International Energy Agency* [40], strategi dekarbonisasi dapat dilakukan melalui empat pendekatan utama:

1. Penggunaan energi bersih
2. Peningkatan efisiensi
3. Penerapan penyimpanan energi
4. Penangkapan karbon (*carbon capture and storage*)

Elektrifikasi sektor transportasi publik, seperti implementasi bus listrik TransJakarta, menjadi langkah strategis untuk mempercepat dekarbonisasi. Bila dikombinasikan dengan teknologi *Vehicle to Grid (V2G)*, armada bus tidak hanya mengurangi emisi langsung, tetapi juga mendukung efisiensi jaringan, penyeimbangan beban, dan peningkatan fleksibilitas sistem tenaga listrik nasional.

2.2.10.3 Elektrifikasi Transportasi dalam Kerangka Dekarbonisasi

Sektor transportasi menyumbang sekitar 15–31% dari total emisi karbon nasional, menjadikannya salah satu kontributor utama perubahan iklim [41]. Elektrifikasi transportasi publik, khususnya armada bus kota, menjadi komponen penting dalam strategi mitigasi iklim dan transisi energi bersih. Elektrifikasi transportasi massal dipandang sebagai intervensi sistemik yang menciptakan mobilitas yang efisien energi, rendah emisi, dan inklusif secara sosial. Salah satu faktor yang memengaruhi tingkat emisi pada proses pembakaran adalah perbandingan udara dan bahan bakar saat proses pengabutan di ruang bakar. Kualitas pengabutan harus baik agar pembakaran berlangsung sempurna, dan proses tersebut bergantung pada kinerja nozzle injektor. Jika nozzle tersumbat oleh kotoran, aliran bahan bakar dapat terganggu sehingga konsumsi bahan bakar berpotensi meningkat [42].

Dalam kerangka *Sustainable Transportation Theory*, elektrifikasi armada TransJakarta memiliki dua fungsi strategis:

1. Sebagai pengguna energi bersih, kendaraan listrik mengurangi emisi langsung dari sektor transportasi, menurunkan polusi udara perkotaan, dan mendukung kualitas lingkungan.
2. Sebagai penyedia fleksibilitas energi, melalui integrasi *Vehicle to Grid (V2G)*, armada bus listrik dapat menyalurkan energi kembali ke jaringan listrik selama

periode beban puncak, membantu stabilisasi frekuensi dan tegangan, serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik..

Implementasi elektrifikasi transportasi publik ini juga sejalan dengan *Green Investment Theory*, yang menekankan bahwa proyek-proyek hijau menghasilkan nilai ekonomi jangka panjang melalui pengurangan biaya eksternal, seperti dampak polusi dan biaya kesehatan masyarakat.

2.2.11 Green Investment dalam Implementasi V2G

Green Investment merupakan pendekatan investasi yang memprioritaskan pembangunan infrastruktur atau proyek dengan dampak positif terhadap lingkungan, sekaligus memberikan keuntungan finansial. Konsep ini memiliki relevansi tinggi dalam transisi energi, elektrifikasi transportasi, dan mitigasi perubahan iklim. *Green Investment* berakar pada prinsip sustainable finance, yang menekankan integrasi kriteria *Environmental, Social, and Governance (ESG)* dalam pengambilan keputusan finansial. Investasi hijau menilai tidak hanya profitabilitas jangka pendek, tetapi juga keberlanjutan jangka panjang, mitigasi risiko lingkungan, dan kontribusi terhadap target nasional maupun global, seperti Net Zero Emission 2060 [43].

1. Karakteristik *Green Investment*

a. Fokus Lingkungan

Proyek harus berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, efisiensi energi, konservasi sumber daya alam, atau pengelolaan limbah.

b. Keuntungan Ekonomi

Selain manfaat lingkungan, proyek green investment tetap diharapkan memberikan imbal hasil finansial yang kompetitif bagi investor.

c. Inovasi Teknologi

Proyek sering melibatkan teknologi baru atau solusi yang lebih efisien, misalnya smart grid, pengisian energi terbarukan, dan sistem V2G.

d. Risiko dan Kepatuhan Regulasi

Investor green cenderung memperhatikan kebijakan pemerintah terkait energi bersih, insentif fiskal, dan kepatuhan terhadap standar lingkungan internasional.

2. Instrumen dan Mekanisme

Beberapa instrumen green investment yang relevan antara lain:

a. Green Bonds

Obligasi yang diterbitkan untuk membiayai proyek ramah lingkungan.

b. *Green Loans* dan Kredit Investasi

Pinjaman dengan bunga yang lebih rendah untuk proyek yang memiliki dampak lingkungan positif.

c. Feed-in Tariff dan Skema Insentif Energi Terbarukan

Memungkinkan investor mendapatkan pengembalian dari energi yang dihasilkan proyek hijau.

d. Skema *Carbon Credit* atau *Cap-and-Trade*

Memberikan nilai ekonomi terhadap pengurangan emisi karbon, yang bisa menjadi bagian dari perhitungan keuntungan investasi.

3. Relevansi *Green Investment* dalam V2G

Implementasi V2G memerlukan investasi pada charger *bidirectional*, perangkat manajemen energi, dan depot yang ramah lingkungan. *Green investment* relevan karena:

- a. Membantu menurunkan biaya modal proyek melalui insentif fiskal, subsidi, atau pembiayaan berbasis obligasi hijau.
- b. Memastikan bahwa teknologi yang diterapkan tidak hanya efisien secara finansial, tetapi juga berkelanjutan dan mendukung mitigasi perubahan iklim.
- c. Memungkinkan integrasi proyek transportasi listrik dengan sumber energi terbarukan, seperti PLTS atap di depot, sehingga meningkatkan nilai tambah ekonomi dan lingkungan.

2.2.12 Analisis Kelayakan Teknis dan Ekonomi

Analisis kelayakan teknis dan ekonomi merupakan tahapan krusial dalam menilai potensi implementasi teknologi V2G. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan sejauh mana sistem dapat dioperasikan secara efektif, efisien, dan berkelanjutan.

Pendekatan ini didasarkan pada teori *Cost-Benefit Analysis* dan *Green Investment*, yang menilai kelayakan proyek dari sisi ekonomi sekaligus manfaat lingkungan dan

sosial. Dua aspek utama yang dinilai ialah kelayakan teknis yang berfokus pada keandalan dan performa sistem serta kelayakan ekonomi, yang menilai efisiensi biaya dan potensi pengembalian investasi.

2.2.12.1 Kelayakan Teknis

Kelayakan teknis menitikberatkan pada kemampuan sistem V2G untuk beroperasi tanpa mengganggu fungsi utama kendaraan sebagai sarana transportasi, serta tanpa menimbulkan gangguan terhadap kestabilan jaringan distribusi listrik. Aspek-aspek teknis utama yang perlu dianalisis meliputi:

1. Profil Penggunaan Armada dan Siklus Pengisian Baterai

Analisis ini melibatkan pemetaan pola operasi harian bus listrik, meliputi waktu aktif beroperasi, periode idle, serta durasi yang tersedia untuk proses pengisian (*charging*) dan pengosongan daya (*discharging*). Informasi tersebut menjadi dasar dalam menentukan jendela waktu optimal V2G, sehingga pengoperasian sistem tidak mengganggu jadwal layanan transportasi publik.

2. Kemampuan Baterai untuk Discharging dan Charging Dua Arah

Kinerja baterai merupakan elemen paling kritikal dalam implementasi V2G. Parameter teknis seperti kapasitas nominal, laju pengisian dan pengosongan (*C-rate*), efisiensi konversi energi, serta jumlah siklus hidup baterai (*battery life cycle*) menjadi faktor utama dalam menentukan kelayakan teknis. Sistem V2G harus memastikan bahwa aktivitas charging dan discharging tidak mempercepat degradasi sel baterai atau menurunkan performa kendaraan secara signifikan.

3. Stabilitas Tegangan dan Frekuensi Jaringan

Aktivitas V2G, terutama pada skala besar, dapat memengaruhi stabilitas sistem distribusi listrik, khususnya dalam hal tegangan dan frekuensi. Oleh karena itu, simulasi sistem tenaga listrik diperlukan untuk memastikan bahwa arus yang dilepaskan dari kendaraan tidak menimbulkan fluktuasi tegangan (*voltage deviation*), distorsi harmonisa, atau gangguan kestabilan frekuensi yang dapat memengaruhi keandalan jaringan.

4. Degradasi Baterai dan Dampaknya terhadap Sistem

Aktivitas pelepasan daya berulang dalam V2G dapat mempercepat penurunan kapasitas baterai (*capacity fade*). Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis degradasi untuk memperkirakan laju penurunan performa dan implikasinya terhadap umur ekonomis baterai. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan dan penggantian baterai, serta dalam menilai pengaruh degradasi terhadap efisiensi dan biaya operasional sistem secara keseluruhan.

2.2.12.2 Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi bertujuan untuk menilai apakah implementasi V2G secara finansial dapat memberikan manfaat yang sebanding atau melebihi biaya investasi dan operasionalnya. Analisis ini mempertimbangkan berbagai indikator keuangan dan parameter biaya yang relevan, di antaranya:

1. *Net Present Value (NPV)*

NPV digunakan untuk mengukur nilai bersih saat ini dari seluruh arus kas masuk dan keluar selama masa proyek. Nilai NPV positif menunjukkan bahwa proyek V2G secara finansial menguntungkan setelah memperhitungkan nilai waktu uang dan tingkat diskonto yang berlaku.

2. *Internal Rate of Return (IRR)*

IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi yang dihasilkan dari penerapan V2G. Apabila nilai IRR melebihi biaya modal (*cost of capital*), maka proyek dinilai layak secara finansial. Analisis ini penting bagi pengambil keputusan dalam menentukan daya tarik investasi proyek V2G.

3. *Payback Period*

Parameter ini menggambarkan waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal investasi awal melalui keuntungan yang diperoleh dari operasi sistem. Semakin pendek periode pengembalian, semakin tinggi tingkat kelayakan proyek.

4. *Analisis Biaya-Manfaat (Cost-Benefit Analysis)*

Analisis ini digunakan untuk membandingkan nilai total manfaat ekonomi, seperti pendapatan dari pelepasan daya ke jaringan (*discharging revenue*), penghematan energi, dan potensi insentif, terhadap biaya investasi, operasi, dan

pemeliharaan (*O&M*). Hasil perbandingan ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai efisiensi ekonomi proyek.

5. Biaya Operasional dan Pemeliharaan (*O&M Costs*)

Biaya ini mencakup pemeliharaan sistem pengisian dua arah (*bidirectional charger*), pengelolaan data energi, serta biaya tambahan akibat degradasi komponen, seperti baterai dan inverter. Evaluasi O&M yang akurat penting untuk memastikan keberlanjutan operasi sistem V2G dalam jangka panjang.

6. Insentif dan Skema Tarif

Kebijakan tarif listrik dari penyedia energi seperti PLN, termasuk skema *insentif feed-in*, *net-metering*, atau *time-of-use pricing*, memiliki pengaruh signifikan terhadap kelayakan ekonomi proyek. Dukungan regulasi berupa subsidi investasi, tarif fleksibel, atau insentif pajak dapat meningkatkan daya tarik finansial dan mempercepat adopsi teknologi V2G di sektor transportasi publik.