

Studi Kelayakan Integrasi Teknologi Vehicle-to-Grid pada Bus Listrik Transjakarta

¹Dimas Agung Hareva Nugraha, ²Eri Prabowo

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: dimas2310089@itpln.ac.id

Received: June 2024; Revised: July 2024; Published: July 2024

Abstrak

Penelitian ini menilai penerapan teknologi Vehicle-to-Grid (V2G) pada armada bus listrik TransJakarta sebagai strategi untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga dan mempercepat transisi energi bersih di perkotaan. Dengan kapasitas baterai rata-rata 338,6 kWh dan depth of discharge 20%, setiap bus mampu menyuplai kembali sekitar 67,72 kWh ke jaringan. Jika seluruh 11.175 unit berpartisipasi penuh, total energi yang dikembalikan mencapai 272,36 MWh dalam lima jam, menurunkan puncak beban sekitar 0,96%, yang meskipun terlihat kecil, berdampak signifikan pada jaringan kota yang padat dan sensitif terhadap fluktuasi beban. Implementasi V2G membutuhkan infrastruktur pengisian dua arah yang handal, dengan 2.800 charger 150 kW di 56 depot, masing-masing membutuhkan daya sekitar 8,8 MVA. Hal ini menekankan pentingnya perencanaan distribusi energi, desentralisasi, dan smart charging untuk menjaga keandalan operasi di ruang kota terbatas. Pada tahap awal dengan 4.470 bus, sistem dapat menyuplai 54,47 MW selama lima jam, menunjukkan peran V2G dalam meratakan beban dan respons cepat terhadap permintaan energi. Dari sisi lingkungan, integrasi V2G diperkirakan mengurangi lebih dari 2 juta ton CO₂ hingga 2060, terutama bila dikombinasikan dengan energi terbarukan di depot. Analisis finansial menunjukkan proyek belum sepenuhnya layak secara ekonomi berdasarkan indikator moneter langsung, namun manfaat eksternal seperti pengurangan emisi, penghematan bahan bakar fosil, dan peningkatan efisiensi sistem memberikan nilai tambah signifikan. Temuan ini menegaskan potensi V2G sebagai komponen strategis dalam memperkuat transportasi listrik dan mendukung Indonesia mencapai target Net Zero Emission 2060.

Kata kunci: Vehicle to Grid (V2G); Bus Listrik; Kelayakan Ekonomi; Emisi Karbon; Net Zero Emission

Feasibility Study of Vehicle-to-Grid Technology Integration in Transjakarta Electric Buses Public Transport

Abstract

This study evaluates the implementation of Vehicle-to-Grid (V2G) technology in the TransJakarta electric bus fleet as a strategy to enhance power system reliability and accelerate the transition to clean urban energy. With an average battery capacity of 338.6 kWh and a 20% depth of discharge, each bus can return approximately 67.72 kWh to the grid. If all 11,175 buses participate in a full V2G scheme, the total energy supplied back could reach 272.36 MWh over five hours, reducing peak demand by about 0.96%. While this percentage seems small, it has a significant impact on Jakarta's dense and load-sensitive urban grid. Implementing V2G requires reliable bidirectional charging infrastructure, with 2,800 chargers at 150 kW across 56 depots, each requiring around 8.8 MVA. This highlights the importance of careful distribution planning, decentralized energy management, and smart charging strategies to maintain operational reliability within limited urban space. In the initial phase, 4,470 buses can deliver 54.47 MW over five hours, demonstrating V2G's effectiveness in load leveling and providing rapid demand-response capabilities. From an environmental perspective, V2G integration is projected to reduce more than 2 million tons of CO₂ cumulatively by 2060, especially when combined with renewable energy at depots. Financial analysis indicates that the project is not yet fully viable based solely on direct economic returns; however, external benefits such as emission reductions, fossil fuel savings, and improved system efficiency offer substantial added value. These findings underscore V2G's potential as a strategic component in strengthening electric public transport and supporting Indonesia's 2060 Net Zero Emission target.

Keywords: Vehicle to Grid (V2G); Electric Bus; Economic Feasibility; Carbon Emission; Net Zero Emission

How to Cite: Nugraha, D. A. H., & Prabowo, E. Studi Kelayakan Integrasi Teknologi Vehicle-to-Grid pada Bus Listrik Transjakarta. *Journal of Authentic Research*. <https://doi.org/10.36312/g3cfkn60>



<https://doi.org/10.36312/g3cfkn60>

Copyright© 2026, Nugraha & Prabowo.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Indonesia sedang mempercepat transisi energi bersih sebagai bagian dari komitmennya untuk mencapai Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060. Dalam upaya untuk mengurangi dampak perubahan iklim, sektor transportasi menjadi fokus utama, mengingat kontribusinya terhadap polusi udara dan emisi gas rumah kaca (Abd et al., 2021; Rehman et al., 2019). Salah satu solusi yang diusulkan untuk mengatasi masalah ini adalah melalui elektrifikasi transportasi, khususnya dengan memperkenalkan kendaraan listrik, seperti bus listrik, yang sudah diimplementasikan melalui TransJakarta. Pemerintah Indonesia juga mendukung inisiatif ini melalui Peraturan Presiden No. 55/2019 yang mengatur pengembangan kendaraan listrik, termasuk bus listrik, dengan tujuan untuk mengurangi jejak karbon sektor transportasi dan meningkatkan kualitas udara di kota-kota besar seperti Jakarta (Ashraf et al., 2020).

Namun, meskipun bus listrik diharapkan dapat mengurangi polusi, penerapan kendaraan listrik pada skala besar, terutama pada sistem transportasi publik, menghadirkan tantangan bagi infrastruktur kelistrikan, khususnya terkait dengan beban puncak yang dapat terjadi pada saat pengisian daya kendaraan. Jaringan distribusi listrik Indonesia, terutama di kota-kota besar, tidak dirancang untuk mendukung lonjakan besar permintaan daya yang terjadi akibat penggunaan kendaraan listrik secara bersamaan. Dalam hal ini, teknologi Vehicle-to-Grid (V2G) menawarkan potensi solusi untuk mengelola dan mengurangi beban puncak ini, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan dalam mendukung transisi energi bersih di Indonesia.

(Comi et al., 2026) menyatakan *Vehicle to Grid* (V2G) merupakan teknologi yang memungkinkan kendaraan listrik untuk tidak hanya menerima daya dari jaringan listrik, tetapi juga memberikan energi kembali ke grid saat dibutuhkan, terutama pada saat beban puncak. Melalui teknologi ini, kendaraan listrik dapat berfungsi sebagai penyimpan energi yang dapat membantu mengurangi tekanan pada sistem kelistrikan saat permintaan tinggi, seperti pada jam sibuk, dengan menyalurkan energi yang tersimpan di dalam baterai kendaraan kembali ke grid (Kumar et al., 2025).

Dengan menggunakan sistem smart grid yang cerdas, teknologi V2G memungkinkan pengelolaan beban secara dinamis dan fleksibel. Smart grid adalah sistem kelistrikan yang dilengkapi dengan teknologi komunikasi dan informasi untuk mengoptimalkan distribusi dan konsumsi energi. Dalam konteks V2G, smart grid memungkinkan pengisian daya kendaraan listrik pada saat beban rendah (off-peak), dan kemudian energi tersebut disalurkan kembali ke grid saat beban puncak. Hal ini membantu menstabilkan sistem kelistrikan tanpa perlu menambah kapasitas pembangkit baru yang berbasis energi fosil, serta mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik yang tidak ramah lingkungan (Hossain et al., 2023; Bortotti et al., 2023).

Penggunaan teknologi V2G dapat memberikan kontribusi besar terhadap dekarbonisasi sektor energi Indonesia, mengingat penggunaan kendaraan listrik sudah terbukti mengurangi emisi CO₂ dibandingkan dengan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Buberger et al. (2022), disebutkan bahwa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari kendaraan listrik jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan kendaraan bermesin pembakaran internal (ICE). Proses produksi, pengoperasian, dan

pembuangan kendaraan listrik yang menggunakan energi dari sumber terbarukan memiliki dampak yang lebih rendah terhadap emisi dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar fosil (Lazkano et al., 2017; Rehman et al., 2019).

V2G juga memiliki potensi untuk menggantikan pembangkit energi fosil pada saat puncak permintaan listrik. Menggunakan energi terbarukan untuk pengisian kendaraan listrik dan kemudian menyalurkannya kembali ke grid pada saat beban puncak dapat mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang sering digunakan pada saat beban puncak. Hal ini akan mengurangi emisi CO₂, NO_x, dan polusi lainnya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil, serta mengurangi polusi udara di kota-kota besar (Ravi & Aziz, 2022).

Selain manfaat lingkungan, teknologi V2G juga dapat memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan. Salah satu keuntungan utama dari V2G adalah kemampuannya untuk mengurangi kebutuhan investasi untuk pembangkit listrik dan infrastruktur jaringan baru. Sebagai contoh, penelitian oleh Bortotti et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi V2G dengan grid dapat mengurangi kebutuhan pembangkit energi tambahan dan infrastruktur jaringan yang mahal, sambil meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan secara keseluruhan. Hal ini sejalan dengan prinsip Green Investment, yang mendorong penggunaan teknologi ramah lingkungan untuk mendukung pembangunan ekonomi yang berkelanjutan.

V2G juga memberikan insentif finansial bagi pemilik kendaraan listrik, karena mereka dapat memperoleh pendapatan dari energi yang disalurkan kembali ke grid. Ini dapat meningkatkan daya tarik kendaraan listrik bagi konsumen, karena kendaraan listrik tidak hanya berfungsi sebagai alat transportasi, tetapi juga sebagai aset yang dapat menghasilkan pendapatan tambahan melalui partisipasi dalam sistem kelistrikan. Hossain et al. (2023) menyatakan bahwa penggabungan sistem V2G dengan smart grid tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga memberikan potensi pendapatan baru bagi pengguna EV, menjadikannya investasi yang lebih menguntungkan.

Meskipun teknologi V2G memiliki banyak potensi, implementasinya di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan dan keterbatasan. Salah satu tantangan terbesar adalah kesiapan infrastruktur kelistrikan yang ada untuk mendukung integrasi teknologi ini. Di Indonesia, sebagian besar infrastruktur kelistrikan di kota-kota besar belum dirancang untuk mendukung integrasi teknologi smart grid dan V2G. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menilai kelayakan implementasi teknologi V2G pada armada bus listrik TransJakarta dengan mempertimbangkan aspek teknis, infrastruktur yang diperlukan, dan kendali smart grid yang diperlukan untuk menjamin kelancaran operasionalnya.

Selain itu, tantangan lain yang dihadapi adalah biaya investasi awal yang tinggi untuk membangun infrastruktur pengisian kendaraan listrik dan integrasi dengan grid listrik. Penelitian *Feasibility Study of Charging Stations Using Renewable Energy-Based Electricity* (2021) menunjukkan bahwa meskipun biaya awal untuk membangun stasiun pengisian kendaraan listrik dengan energi terbarukan cukup tinggi, dalam jangka panjang, penerapan teknologi ini akan mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan membawa manfaat ekonomi yang signifikan.

Penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) dalam menerapkan teknologi V2G pada sektor transportasi publik di Indonesia, khususnya pada armada bus listrik TransJakarta. Sebagian besar penelitian yang ada sebelumnya lebih banyak berfokus

pada kendaraan pribadi dan sektor perumahan. Oleh karena itu, penelitian ini sangat relevan untuk mengisi kekosongan tersebut, dengan mengkaji implementasi V2G dalam konteks transportasi publik di Indonesia, yang memiliki karakteristik operasional berbeda, seperti pengoperasian terjadwal dan armada kendaraan yang lebih besar. Dengan mengintegrasikan kapasitas energi kendaraan, infrastruktur pengisian, dan eksport energi ke jaringan, penelitian ini bertujuan untuk memperkuat ketahanan energi nasional, meningkatkan stabilitas sistem kelistrikan, serta mengurangi emisi nasional.

Urgensi penelitian ini sangat tinggi, mengingat Indonesia memiliki komitmen kuat untuk mencapai NZE pada tahun 2060, dan sektor transportasi merupakan salah satu kontributor utama emisi karbon di Indonesia. Penerapan teknologi V2G dapat membantu Indonesia dalam mencapai target dekarbonisasi tersebut, meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan, dan mengurangi polusi udara di kota-kota besar. Penelitian ini juga memberikan kontribusi besar dalam merumuskan kebijakan energi yang lebih baik di masa depan, seiring dengan meningkatnya adopsi kendaraan listrik dan kebutuhan untuk mengelola sistem kelistrikan yang semakin kompleks.

METODE

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, pengumpulan data sekunder, dan observasi lapangan. Studi literatur mencakup jurnal ilmiah, laporan teknis, dan standar terkait *smart grid* dan *vehicle-to-grid* (V2G) sebagai dasar penentuan skenario dan parameter analisis. Data sekunder diperoleh dari PT PLN (Persero), Kementerian ESDM, Dinas Perhubungan Provinsi DKI Jakarta, dan PT Transportasi Jakarta, meliputi data armada bus listrik.

Proyeksi pertumbuhan armada dimodelkan menggunakan pendekatan linear, eksponensial, dan logistik sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1)-(3):

$$\begin{aligned} Y_t &= Y_0 + b \times t \\ Y_t &= Y_0 \times (1 + r)^t \\ Y_t &= \frac{K}{1 + \left(\frac{K - Y_0}{Y_0}\right)e^{-rt}} \end{aligned}$$

Dengan Y_t menyatakan nilai variabel pada tahun ke- t , Y_0 nilai awal, b laju pertumbuhan linear, r laju pertumbuhan tahunan, dan K kapasitas maksimum sistem. Model logistik digunakan untuk merepresentasikan keterbatasan kapasitas dalam perencanaan jangka panjang.

Daya rata-rata yang dapat disuplai melalui skema *vehicle-to-grid* (V2G) dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$P_{V2G}(avg) = \frac{N \times C \times \alpha \times \eta}{T}$$

di mana N adalah jumlah armada, C kapasitas baterai, α state of charge (SoC), η efisiensi sistem, dan T durasi penyaluran daya.

Energi dan daya operasional sistem ditentukan melalui Persamaan (5) dan (6):

$$E_{operasional} = N_{bus} \times \text{Jarak Operasional} \times \text{Konsumsi Energi}$$

$$P_{total} = \frac{E_{operasional}}{\text{efisiensi} \times \text{Jam}}$$

Umur layanan infrastruktur pengisian kendaraan listrik (EVCS) dianalisis menggunakan *Mean Time to Failure* (MTTF) berbasis distribusi Weibull:

$$MTTF = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

dengan η sebagai parameter skala (umur layanan) dan β sebagai parameter bentuk.

Emisi karbon dioksida pada kondisi baseline dan sistem kendaraan listrik dihitung menggunakan Persamaan (8)-(11):

$$\begin{aligned} CO_{2,baseline} &= N \times FC_{veh} \times EF_{fuel} \\ CO_{2,EV\ oper} &= N \times E_{EV} \times EF_{grid} \\ CO_{2,EVnet} &= CO_{2,EV_oper} - CO_{2,avoided} + CO_{2,losses} \\ \Delta CO_2 &= CO_{2,baseline} - CO_{2,EVnet} \end{aligned} \quad (9)$$

Dimana ΔCO_2 merepresentasikan potensi penurunan emisi bersih akibat penerapan elektrifikasi dan V2G.

Evaluasi kelayakan ekonomi dilakukan menggunakan indikator *Net Present Value (NPV)*, *Benefit Cost Ratio (BCR)*, *Internal Rate of Return (IRR)*, *Payback Period (PP)*, dan *Levelized Cost of Energy (LCOE)* sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (12)-(16):

$$\begin{aligned} NPV &= \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} - TOTAL\ CAPEX_t \\ BCR &= \frac{\sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \\ 0 &= -C_0 + CF \times 1 - \frac{(1+r)^{-n}}{r} \\ PP &= \frac{C_0}{CF_t} \\ LCOE &= \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \end{aligned}$$

Formulasi ini digunakan untuk menilai kinerja teknis, lingkungan, dan ekonomi dari integrasi armada bus listrik dan V2G dalam sistem *smart grid* perkotaan secara komprehensif.

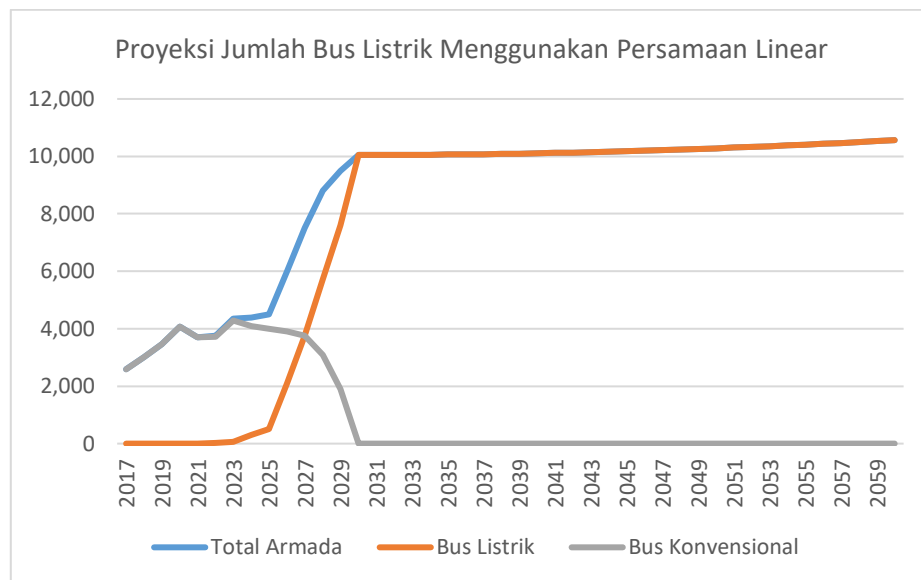
HASIL DAN PEMBAHASAN

Proyeksi Pertumbuhan Bus Listrik

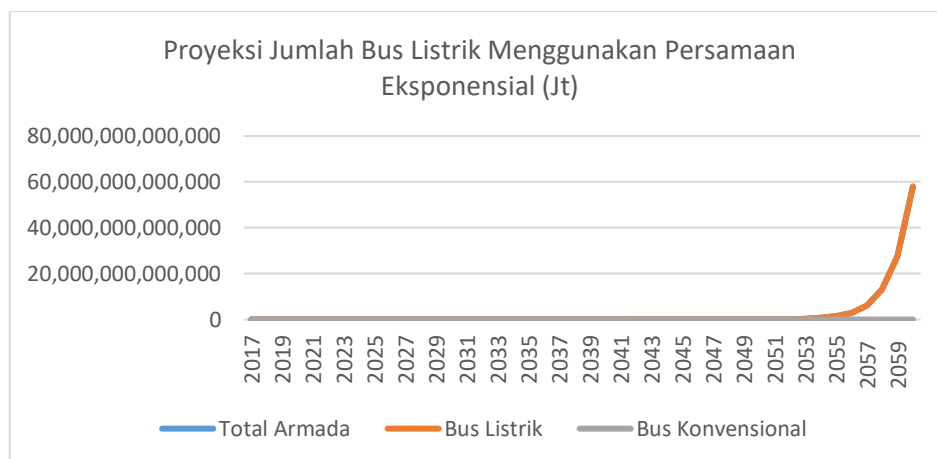
Berdasarkan data TransJakarta, jumlah armada yang beroperasi mencapai 4.388 unit, terdiri atas bus diesel, gas, dan listrik yang mulai diimplementasikan sejak 2022. Dalam peta jalan transportasi berkelanjutan, TransJakarta menargetkan elektrifikasi 50% armada pada 2027 dan elektrifikasi penuh pada 2030, setara dengan sekitar 10.047 unit bus listrik, dengan pertumbuhan armada rata-rata sekitar 12% per tahun pada periode 2017–2030 (Toolkit Perencanaan Bus Listrik, 2023).

Elektrifikasi armada TransJakarta menunjukkan tren akseleratif pada periode 2022–2030. Pangsa bus listrik meningkat dari 0,8% (30 unit) pada 2022 menjadi 11% (500 unit) pada 2025, lalu melonjak tajam pada 2026–2027 hingga mencapai 35% (2.100 unit) dan 50% (3.750 unit). Pada fase lanjut, elektrifikasi mendominasi armada dengan capaian 65% pada 2028 dan 80% pada 2029, hingga mencapai elektrifikasi penuh pada 2030 dengan total 10.047 unit bus listrik.

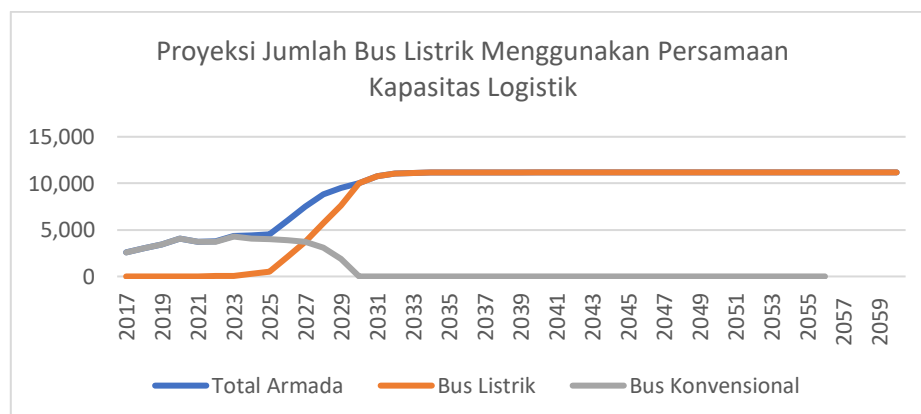
Proyeksi pertumbuhan tersebut menjadi dasar dalam mengestimasi potensi kapasitas penyimpanan energi melalui skema *vehicle-to-grid (V2G)*, karena peningkatan jumlah bus listrik secara langsung meningkatkan kapasitas energi terdistribusi yang dapat dimanfaatkan oleh sistem *smart grid*.



Gambar 1. Proyeksi Jumlah Bus Listrik Menggunakan Persamaan Linear



Gambar 2. Proyeksi Jumlah Bus Listrik Menggunakan Persamaan Eksponensial



Gambar 3. Proyeksi Jumlah Bus Listrik Menggunakan Persamaan Pertumbuhan Logistik

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2, proyeksi jumlah bus listrik TransJakarta berbeda antar model. Model linear menunjukkan peningkatan konsisten hingga sekitar 10.047 unit pada 2025-2030, mencapai elektrifikasi penuh pada 2029, lalu stabil

dengan fokus pada efisiensi, V2G, dan keberlanjutan. Model eksponensial mencatat pertumbuhan cepat awal 2017-2027, dari 30 unit pada 2022 menjadi >3.000 unit pada 2027, namun tidak realistis setelah 2030 karena mengabaikan keterbatasan infrastruktur.

Berdasarkan data BPS DKI Jakarta 2019-2025, pertumbuhan penduduk sekitar 0,19% per tahun mencapai 10.684.946 jiwa pada 2024, sementara armada TransJakarta 4.388 unit menghasilkan rasio layanan 0,41 bus per 1.000 penduduk, masih relatif rendah. Penambahan armada diperlukan untuk mendukung target elektrifikasi 50% pada 2027 dan penuh pada 2030, serta menyesuaikan dengan pertumbuhan penduduk dan mobilitas. Pada 2030, rasio layanan diproyeksikan 0,93 bus per 1.000 penduduk, menurun menjadi 0,88 pada 2060 jika kapasitas tidak ditingkatkan. Dibandingkan kota besar seperti Singapura, Seoul, dan London dengan rasio ideal 1 bus per 750–1.500 penduduk, Jakarta masih tertinggal (Institute for Transportation Development Policy (ITDP), 2024). Dengan kapasitas maksimum armada TransJakarta (K) 11.175 unit, rasio dapat mendekati standar ideal sekitar 1 bus per 1.025 penduduk. Proyeksi menggunakan Persamaan (3) menunjukkan pertumbuhan armada bus listrik mengikuti pola logistik, dengan percepatan elektrifikasi pada 2024–2030 hingga >90% armada dan stabilisasi mendekati kapasitas sistem, sehingga model ini lebih realistis untuk perencanaan jangka panjang dibandingkan model eksponensial.

Estimasi Infratuktur yang Dibutuhkan

Tabel 1. Proyeksi Kondisi Bus Listrik TransJakarta pada Tahun 2060

Parameter	Nilai	Keterangan
Total armada bus listrik	11.175 unit	Proyeksi total armada pada tahun 2060
Kapasitas baterai per bus	322–350 kWh	Baterai lithium iron phosphate (LFP)
Konsumsi energi per km	1,64 kWh/km	Rata-rata bus listrik berukuran besar
Jarak tempuh harian	206 km	Rata-rata operasi harian TransJakarta
Efisiensi sistem pengisian	90%	Termasuk charger dan konversi daya
Waktu pengisian penuh	4-6 jam	Pengisian lambat/menengah
Durasi pelepasan daya (V2G)	5 jam	Periode beban puncak PLN

Berdasarkan hasil proyeksi, jumlah maksimum bus listrik TransJakarta pada tahun 2060 diperkirakan mencapai 11.175 unit. Dengan kapasitas baterai rata-rata sebesar 338,6 kWh per unit, total potensi energi tersimpan pada armada mencapai sekitar 3.783 GWh. Namun, tidak seluruh armada beroperasi atau terhubung ke jaringan secara bersamaan. Mengacu pada Referensi (Toolkit Perencanaan Bus Listrik, 2023), sekitar 60% armada beroperasi pada jam sibuk, sedangkan 40% berada dalam kondisi idle dan berpotensi dimanfaatkan untuk pengisian daya maupun layanan vehicle-to-grid (V2G), sebagaimana dimodelkan dalam Persamaan (4).

$$P_{V2G} = \frac{11.175 \times 338,6 \times 0,4}{5} = 302.708,4 \text{ kWh} = 302,70 \text{ MWh}$$

Berdasarkan data beban PLN 2019–2024, beban puncak Jakarta diproyeksikan mencapai 5.638 MW pada 2060 dengan laju pertumbuhan 0,52% per tahun. Dengan

integrasi V2G dan batas minimum SoC 20%, setiap bus listrik dapat menyuplai 67,72 kWh atau daya rata-rata 13,54 kW selama lima jam. Dengan partisipasi 4.470 bus, daya efektif yang tersedia mencapai sekitar 54,47 MW dan energi yang diekspor sebesar 272,36 MWh, setara dengan penurunan beban puncak sekitar 0,96%, yang menunjukkan kontribusi V2G bersifat terbatas namun signifikan bagi pengurangan beban jaringan pada periode kritis.

Persamaan (5):

$$E_{operasional} = 11.175 \times 206 \times 1,64 = 3.775.362 \frac{kWh}{hari}$$

Persamaan (6):

Dengan efisiensi pengisian 90% dan waktu 5 jam:

$$P_{total} = \frac{3.775.362}{0,9 \times 5} = 838.969 \text{ kW} = 838,97 \text{ MW}$$

Operasi dan pengisian armada TransJakarta dibagi dalam empat periode. Pada jam operasi pagi dan sore, masing-masing 6.705 bus beroperasi sementara 4.470 bus melakukan pengisian. Pada periode non-puncak siang dan malam, pengisian dilakukan melalui dua *batch*, masing-masing melibatkan 2.200 dan 2.270 bus, untuk menjaga kontinuitas operasi dan kesiapan energi armada. Sehingga daya pengisian yang bisa digunakan untuk pengisian ini sebesar 419,48 MW. Atau 420 MW untuk setiap shift nya.

Menurut ITDP, kepadatan ideal depot bus listrik sekitar 200 unit per depot (Feasibility Study of Charging Stations Using Renewable Energy-Based Electricity and Solar PV Systems for Transjakarta Supporting Jakarta's Transition to E-Mobility, 2021)

sehingga untuk melayani 11.175 bus listrik diperlukan sekitar 56 depot. Untuk memenuhi kebutuhan pengisian aktif sebesar 420 MW, dibutuhkan 2.800 *bidirectional charger* berkapasitas 150 kW atau sekitar 50 *charger* per depot, yang menuntut infrastruktur kelistrikan depot berkapasitas tinggi. Umur layanan *Electric Vehicle Charging Station (EVCS)* umumnya 10-15 tahun untuk sistem AC dan 8-12 tahun untuk sistem DC; pada penelitian ini digunakan nilai $\eta=12$ tahun dengan koefisien bentuk $\beta=1,5$ yang merepresentasikan peningkatan laju kegagalan seiring waktu (Quality-One, n.d.; queendomgroup, 2025).

Persamaan (7):

$$MTTF = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,5}\right) = \Gamma(1 + 0.6667) = 0.9027$$

$$MTTF = 12 \times 0.9027 = 10.83 \text{ tahun} = 11 \text{ tahun}$$

Estimasi Reduksi Emisi

Potensi penurunan emisi dianalisis dengan armada bus diesel sebagai skenario dasar. Dengan jarak tempuh 206 km/hari, konsumsi 0,18 L/km (Mandala No et al., 2017), dan 300 hari operasi, setiap bus mengonsumsi sekitar 11.124 liter solar per tahun. Untuk 11.175 unit, konsumsi tahunan mencapai 124,31 juta liter, menghasilkan emisi sekitar 333 ribu ton CO₂ per tahun (Nia Ambarsari et al., 2019), yang dapat dieliminasi melalui elektrifikasi penuh armada TransJakarta.

Persamaan (8):

$$CO_{2,baseline} = 11.175 \times 11.124 \times 2.68 = 333.152.676 \frac{kg CO_2}{tahun} = 333.152 \frac{ton CO_2}{tahun}$$

Emisi operasional bus listrik tanpa V2G dihitung dari konsumsi 101.580 kWh per bus per tahun dan faktor emisi 0,039 kg CO₂/kWh pada 2060. Untuk 11.175 unit, emisi mencapai 3,96 ton CO₂ per bus atau 44,3 ribu ton CO₂ per tahun, jauh lebih rendah dibanding bus diesel.

Persamaan (9):

$$CO_{2,EV oper} = 11.175 \times 101.580 \times 0.039 = 44.679.033 \frac{kg CO_2}{tahun} = 44.679 \frac{ton CO_2}{tahun}$$

Potensi ekspor energi melalui V2G diperkirakan 681 MWh/hari atau 204,3 GWh/tahun dengan fraksi ekspor 20% dan efisiensi 90%, yang dapat menghindari sekitar 194.112 ton CO₂ per tahun. Rugi-rugi sistem 5% (56,76 GWh) menambah 2,2 ribu ton CO₂, sehingga emisi bersih V2G dihitung dari kombinasi emisi operasional, emisi terhindarkan, dan emisi akibat rugi-rugi sistem pada armada bus listrik TransJakarta.

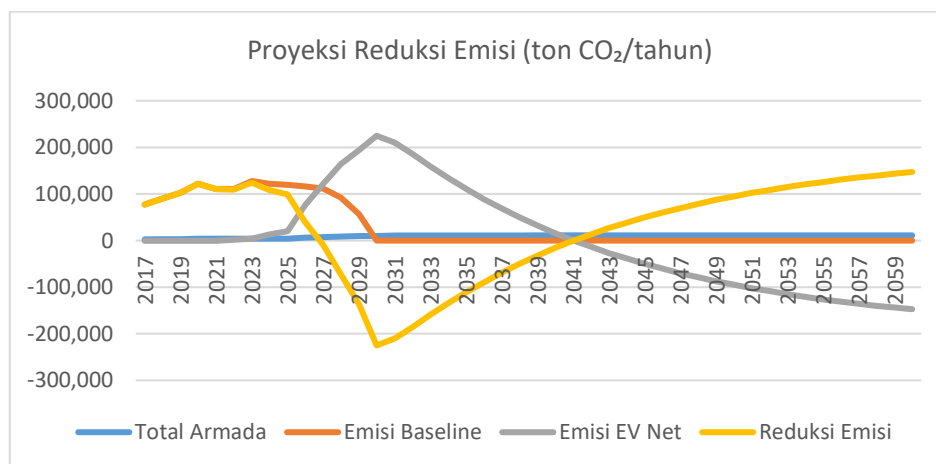
Persamaan (10):

$$CO_{2,EVnet} = 44.679 - 194.112 + 2.2 = -147.199 \frac{ton CO_2}{tahun}$$

Emisi bersih negatif menunjukkan V2G tidak hanya menghilangkan emisi operasional bus listrik, tetapi juga berkontribusi pada penurunan emisi nasional melalui suplai energi bersih ke jaringan. Dibanding bus diesel, hal ini menegaskan peran strategis V2G dalam dekarbonisasi transportasi dan ketenagalistrikan secara simultan.

Persamaan (11):

$$\Delta CO_2 = 333.152 - (-147.199) = 480.351 \frac{ton CO_2}{tahun}$$



Gambar 4. Proyeksi Reduksi Emisi

Proyeksi menunjukkan pergeseran emisi transportasi Jakarta seiring elektrifikasi penuh armada TransJakarta pada 2030. Emisi bus fosil meningkat pada fase transisi lalu turun ke nol, sementara emisi bus listrik menurun tajam dan menjadi negatif setelah 2040 berkat dekarbonisasi listrik dan integrasi V2G, dengan tren penurunan berlanjut hingga 2060, menegaskan manfaat jangka panjang elektrifikasi dan V2G untuk mitigasi perubahan iklim.

Analisis Ekonomi

Pengembangan infrastruktur V2G seiring elektrifikasi armada TransJakarta dari 500 unit pada 2025 menjadi 11.175 unit pada 2060. Dengan rasio pengisi daya 1:4 dan dua shift operasional, kebutuhan titik pengisian meningkat bertahap, didukung hingga 56 depo utama untuk menjamin ruang, daya, dan keandalan integrasi V2G.

Pengembangan infrastruktur pendukung elektrifikasi TransJakarta berlangsung bertahap hingga mencapai kondisi jenuh. Jumlah bus listrik meningkat dari 500 unit pada 2025 menjadi 10.047 unit pada 2030, seiring penambahan terminal dari 5 menjadi 51 dan pemasangan 2.550 *EV charger*. Setelah 2032, sistem mencapai kapasitas maksimum dengan 11.175 bus, 56 terminal (51 terminal baru), dan sekitar 2.800 *charger*, yang kemudian relatif stabil hingga 2060.

Tabel 2. Parameter Ekonomi dan Teknis Utama Sistem V2G

Parameter	Nilai	Keterangan
Horizon waktu	2025–2060	35 tahun
Discount rate (i)	8,47%	Tingkat diskonto investasi
Inflasi tahunan (f)	3%	Kenaikan harga umum tahunan
Eskalasi tarif listrik	2,76%	Penyesuaian harga energi/tahun
Rasio charger : EV	0,4	1 charger untuk 4 armada (2 shift)
Charger per terminal	50	Unit
Kurs 1 USD	16.700	IDR
CAPEX awal per charger	15.000	USD/Tahun dasar 2025 (Xiamen Galaxy Energy Technology Co., n.d.)
OPEX tahunan	1,5% × CAPEX	Biaya operasi dan pemeliharaan
Energi per charger	73.138	1 Cycle/300 hari

Tarif listrik (V2G)

485

Belum termasuk layanan ancillary (2%)

Berdasarkan proyeksi 2.806 pengisi daya aktif pada 2060, inflasi 35 tahun sebesar 2,81 menaikkan biaya investasi menjadi Rp 704,87 juta per unit, dengan total CAPEX Rp 1,97 triliun. Biaya operasi dan pemeliharaan tahunan 1,5% dari investasi (Jeffries & White, 2012) atau Rp 29,6 miliar. Dengan produksi energi V2G 73.137 kWh per unit/tahun dan tarif ekspor Rp 485/kWh (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2006), eskalasi 2,76% per tahun, serta faktor *ancillary service* 1,02 (GIZ Energy Programme Indonesia, 2024), total pendapatan tahunan diperkirakan Rp 202,6 miliar, menghasilkan arus kas bersih sekitar Rp 173,0 miliar.

Persamaan (12):

$$NPV = \sum_{t=1}^{35} \frac{(73.138 \times 2.800 \times 485 \times 1.02) - (1,5\% \times 1.973.643.125.496)}{(1 + 0.0847)^{35}} - Rp. 1.973.643.125.496$$

$$NPV = - Rp. 1.137.984.810.950$$

Persamaan (13):

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} = \frac{1.180.685.671.637}{23.346.851.163.187} = 0,0505$$

Persamaan (14):

$$0 = -C_0 + CF \times 1 - \frac{(1+r)^{-n}}{r}$$

$$1.973.643.125.496 = 172.998.720.030 \times 1 - \frac{(1+r)^{-35}}{r}$$

$$r = 0.0821 = 8,21\%$$

Persamaan (15):

$$PP = \frac{C_0}{CF_{35}} = \frac{1.973.643.125.496}{172.998.720.030} = 11,4 \text{ tahun}$$

Persamaan (16):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

$$LCOE = \frac{(29.604.646.882 \times 11,6545) + 1.973.643.125.496}{57.002.696 \text{ kWh} \times 11,6545} = Rp. 3.497/kWh$$

Analisis 35 tahun dengan diskonto 8,47% menunjukkan elektrifikasi penuh armada TransJakarta belum layak secara finansial (NPV -Rp 1,14 triliun, BCR 0,0505, IRR 8,21%, payback 11,4 tahun, LCOE Rp 3.497/kWh). Meski manfaat finansial langsung belum menutupi biaya, program ini tetap strategis untuk transisi transportasi rendah karbon, sehingga diperlukan dukungan kebijakan, pembiayaan inovatif, dan pengurangan biaya untuk meningkatkan kelayakan jangka panjang.

KESIMPULAN

Program elektrifikasi armada TransJakarta berpotensi mendukung stabilitas jaringan melalui V2G, dengan tiap bus 338,6 kWh (20% DOD) menyuplai 67,72 kWh per siklus, sehingga total 11.175 unit dapat memberikan 272,36 MWh. Implementasi memerlukan 2.800 charger 150 kW di 56 depo (8,8 MVA per depo), menekankan pentingnya perencanaan ruang, distribusi, dan *smart charging*. Fase awal 4.470 bus dapat menyediakan 54,47 MW selama lima jam, menurunkan puncak beban hampir 1% dan mendukung integrasi energi terbarukan, dengan proyeksi pengurangan >2 juta ton CO₂ hingga 2060. Analisis finansial menunjukkan proyek belum layak secara moneter (NPV -Rp 1,14 triliun, IRR < diskonto, payback 11,4 tahun, LCOE Rp 3.497/kWh), namun manfaat sosial dan lingkungan membuat proyek tetap strategis untuk dekarbonisasi perkotaan dan mendukung target *Net Zero Emission* Indonesia

REFERENSI

- Abd, A. A., Othman, M. R., & Kim, J. (2021). A review on application of activated carbons for carbon dioxide capture: Present performance, preparation, and surface modification for further improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43329–43364. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15121-9>
- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Ashraf, M., Khan, I., Usman, M., Khan, A., Shah, S. S., Khan, A. Z., Saeed, K., Yaseen, M., Ehsan, M. F., Tahir, M. N., & Ullah, N. (2020). Hematite and Magnetite Nanostructures for Green and Sustainable Energy Harnessing and Environmental Pollution Control: A Review. *Chemical Research in Toxicology*, 33(6), 1292–1311. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.9b00308>
- Biswas, P., Rashid, A., Al Masum, A., Nasim, A. Al, Anas Ferdous, A. S. M., Datta Gupta, K., Biswas, A., & Al Nasim, A. (2016). An Extensive and Methodical Review of Smart Grids for Sustainable Energy Management-Addressing Challenges with AI, Renewable Energy Integration and Leading-edge Technologies. *IEEE Access*, 4. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.DOI>
- Bortotti, M. F., Rigolin, P., Udaeta, M. E. M., & Grimoni, J. A. B. (2023). Comprehensive Energy Analysis of Vehicle-to-Grid (V2G) Integration with the Power Grid: A Systemic Approach Incorporating Integrated Resource Planning Methodology. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/app132011119>

- Buberger, J., Kersten, A., Kuder, M., Eckerle, R., Weyh, T., & Thiringer, T. (2022). Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112158>
- Comi, A., Atumo, E. A., & Elnour, E. (2026). Electric Vehicles to Support Grid Needs: Evidence from a Medium-Sized City. *Vehicles*. <https://doi.org/10.3390/vehicles8020030>
- Ding, Y.-L., Cano, Zachary P, Yu, A., Lu, Jun, Chen, Z., Ding, Y. L., Cano, Z P, Yu, A. P., Chen, Z. W., & Lu, J. (n.d.). *Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives*.
- Feasibility Study of Charging Stations Using Renewable Energy-Based Electricity and Solar PV Systems for Transjakarta Supporting Jakarta's Transition to E-Mobility*. (2021).
- GIZ Energy Programme Indonesia. (2024). *Ancillary Services: Biaya, Tren, dan Kebijakan*.
- Hossain, S., Rokonuzzaman, M., Rahman, K. S., Habib, A. K. M. A., Tan, W. S., Mahmud, M., Chowdhury, S., & Channumsin, S. (2023). Grid-Vehicle-Grid (G2V2G) Efficient Power Transmission: An Overview of Concept, Operations, Benefits, Concerns, and Future Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075782>
- Institute for Transportation Development Policy (ITDP). (2024). *Peta Jalan Nasional untuk Elektrifikasi Transportasi Publik Perkotaan Berbasis Jala*.
- Jeffries, A., & White, P. (2012). *Transmission Access Pricing for Renewable Energy Generation*. www.adb.org/poverty
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2006, July 20). Menteri ESDM Keluarkan Patokan Harga Tertinggi Listrik IPP. <https://www.esdm.go.id/Id/Media-Center/News-Archives/Menteri-Esdm-Keluarkan-Patokan-Harga-Tertinggi-Listrik-Ipp>.
- Kumar, P., Channi, H. K., Kumar, R., Rajiv, A., Kumari, B., Singh, G., Singh, S., Dyab, I. F., & Lozanović, J. (2025). A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100864. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>
- Lazkano, I., Nøstbakken, L., & Pelli, M. (2017). From fossil fuels to renewables: The role of electricity storage. *European Economic Review, Combating Climate Change. Lessons from Macroeconomics, Political Economy and Public Finance*, 99, 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2017.03.013>
- Mandala No, J. V, Jati, K., & Timur, J. (2017). *PELAPORAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH KACA DKI JAKARTA DINAS LINGKUNGAN HIDUP PROVINSI DKI JAKARTA*.
- Nia Ambarsari, D., Eka Sari, K., & Maulidi Jurusan Perencanaan Wilayah dan Kota, C. (2019). *EMISI CO₂ KENDARAAN BERMOTOR KAWASAN ALUN-ALUN KOTA BATU* (Vol. 8, Number 1).
- Quality-One. (n.d.). *Weibull Analysis*. <https://Quality-One.Com/Weibull/>. Retrieved November 11, 2025, from <https://quality-one.com/weibull/>
- queendomgroup. (2025, March 16). *What is the Lifespan of an EV Charger? Unveiling the Longevity of Your Electric Vehicle Charging Equipment*. https://Queendomgroup.Com/What-Is-the-Lifespan-of-an-Ev-Charger-Unveiling-the-Longevity-of-Your-Electric-Vehicle-Charging-Equipment/?Utm_source=chatgpt.Com.

- Rehman, A., Rauf, A., Ahmad, M., Chandio, A. A., & Deyuan, Z. (2019). The effect of carbon dioxide emission and the consumption of electrical energy, fossil fuel energy, and renewable energy, on economic performance: Evidence from Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21760–21773. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05550-y>
- Ravi, S. S., & Aziz, M. (2022). Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives. In *Energies* (Vol. 15, Number 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15020589>
- Toolkit Perencanaan Bus Listrik*. (2023).
- Xiamen Galaxy Energy Technology Co., Ltd. (n.d.). *Public V2g Bidirectional Solar Charge Pos Terminal Super Fast Electric Vehicle Charging Station 150 kW Ev Charger with Screen*. Retrieved October 15, 2025, from https://www.alibaba.com/product-detail/Public-V2g-Bidirectional-Solar-ChargePos_1601110901417.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.3.781d67af8WP0fA&priceId=4da5f4a547ce45669f8971f8a1ca5364