
Implementasi Teknologi Ramah Lingkungan pada Smart Charging Kendaraan Listrik: Model Optimasi Berdasarkan Data Jenis Mobil Listrik

Wahyu Priyono¹, Ahmad Nugroho Jati², Tedi Oktavianto³

Departemen teknik elektro dan elektronika Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

E-mail: wahyupriyono@uny.ac.id¹, ahmadnugrohojati@uny.ac.id², tedioktavianto@uny.ac.id³

Article History:

Received: 10 Agustus 2025

Revised: 26 September 2025

Accepted: 29 September 2025

Keywords: *Electric Vehicle, emisi karbon, Baterai*

Abstract: *Kendaraan listrik (electric vehicles/EVs) kini banyak dipandang sebagai salah satu pendekatan utama dalam upaya pengurangan emisi karbon di sektor transportasi darat. Tingkat efektivitas pengurangan emisi dari kendaraan ini bergantung pada sejumlah faktor, termasuk kapasitas baterai, jangkauan maksimal kendaraan, serta sumber energi yang digunakan selama proses pengisian daya. Studi ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi reduksi emisi karbon kendaraan listrik di Indonesia dengan mempertimbangkan klasifikasi kapasitas baterai dan jarak tempuh. Perbandingan dilakukan terhadap kendaraan berbahan bakar bensin dengan menggunakan standar emisi 0,231 kg CO₂/km, serta asumsi bahwa kendaraan listrik hanya menghasilkan 37,05% dari total emisi kendaraan konvensional untuk jarak yang sama. Klasifikasi kendaraan dilakukan berdasarkan kapasitas baterai ke dalam tiga kelompok (<50 kWh, 50–70 kWh, dan >70 kWh), serta berdasarkan jarak tempuh menjadi tiga kategori (<200 km, 200–400 km, dan >400 km). Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun besaran pengurangan emisi per 100 km relatif seragam di semua kategori, efisiensi pengurangan emisi per satuan kapasitas energi (kWh) cenderung menurun seiring bertambahnya ukuran baterai. Di sisi lain, kendaraan dengan jangkauan yang lebih panjang memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap total emisi yang dapat dikurangi. Temuan ini penting sebagai dasar pengambilan kebijakan dan pengembangan strategi teknologi kendaraan listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan.*

PENDAHULUAN

Krisis iklim global yang dipicu oleh meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂), telah memicu perubahan signifikan dalam sektor energi dan transportasi (Song et al., 2023). Berdasarkan laporan dari International Energy Agency (IEA), sektor transportasi bertanggung jawab atas hampir 24% dari total emisi CO₂ global yang

berkaitan dengan energi, dengan kontribusi terbesar berasal dari kendaraan bermotor berbahan bakar fosil (Nguyen and Choi, 2023). Untuk menjawab permasalahan lingkungan ini, pemanfaatan kendaraan listrik (electric vehicles/EVs) mengalami pertumbuhan yang pesat dalam dekade terakhir dan telah diidentifikasi sebagai pendekatan strategis dalam upaya dekarbonisasi transportasi darat (Li, Zhang and Wang, 2025).

Kendati kendaraan listrik tidak menimbulkan emisi langsung selama pengoperasiannya, kemampuan nyata mereka dalam mengurangi emisi karbon secara keseluruhan bergantung pada sejumlah faktor utama (Tu et al., 2020). Faktor-faktor tersebut mencakup efisiensi sistem konversi energi, kapasitas baterai, pola penggunaan harian kendaraan, serta campuran sumber energi listrik yang digunakan dalam proses pengisian daya (Wu et al., 2025). Beberapa kajian mutakhir, termasuk publikasi dari Nature Communications (2024) dan Global EV Outlook 2024 oleh IEA, menunjukkan bahwa kendaraan listrik memiliki emisi karbon siklus hidup yang jauh lebih rendah dibanding kendaraan konvensional berbahan bakar bensin, terlebih jika didukung oleh sistem pembangkit berbasis energi terbarukan.

Studi ini berfokus pada penilaian efisiensi pengurangan emisi karbon oleh kendaraan listrik dengan mengkaji kapasitas baterai serta jarak tempuh maksimum sebagai dua parameter utama (Syla et al., 2024). Data penelitian diperoleh dari spesifikasi teknis kendaraan listrik yang tersedia di pasar Indonesia (Ev-Database, no date) (Pod-point, no date). Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan estimasi emisi CO₂ dari kendaraan listrik terhadap emisi kendaraan bensin, menggunakan nilai acuan sebesar 0,231 kg CO₂ per kilometer untuk kendaraan konvensional. Dengan asumsi bahwa kendaraan listrik menghasilkan sekitar 37,05% dari emisi kendaraan bensin untuk jarak tempuh yang sama, maka potensi pengurangan emisi dapat dihitung secara sistematis (Cai et al., 2024).

Dalam analisis ini, kendaraan dikelompokkan berdasarkan kapasitas baterainya ke dalam tiga kategori: kecil (<50 kWh), sedang (50–70 kWh), dan besar (>70 kWh). Sementara itu, klasifikasi jarak tempuh dibagi menjadi kategori pendek (<200 km), menengah (200–400 km), dan jauh (>400 km). Temuan menunjukkan bahwa meskipun jumlah pengurangan emisi karbon per 100 km relatif seragam antar kategori, efisiensi pengurangan emisi per satuan kapasitas energi (kWh) menurun seiring bertambahnya kapasitas baterai (Dixon et al., 2022). Dengan kata lain, kendaraan dengan baterai kecil menunjukkan efisiensi pengurangan emisi yang lebih tinggi per unit energi dibandingkan dengan kendaraan berkapasitas baterai besar. Selain itu, kendaraan dengan jangkauan jarak jauh secara total memberikan kontribusi pengurangan emisi yang lebih signifikan (Huber, 2021).

Hasil penelitian ini memiliki relevansi strategis dalam pengembangan sistem kendaraan listrik berkelanjutan, baik dari sisi optimalisasi desain teknis maupun kebijakan energi dan lingkungan. Pemahaman mendalam mengenai korelasi antara kapasitas baterai, efisiensi energi, dan potensi penurunan emisi dapat digunakan sebagai landasan untuk perumusan kebijakan yang mendukung pengembangan teknologi hijau (green technology) secara lebih efektif dan berkelanjutan (Zhang, 2020).

METODE PENELITIAN

Sumber Data

Penelitian ini didasarkan pada data sekunder yang berasal dari spesifikasi teknis berbagai jenis kendaraan listrik yang tersedia di pasar otomotif Indonesia (Ev-Database, no date; Pod-point, no date). Informasi yang dikumpulkan mencakup merek kendaraan, kapasitas baterai dalam satuan kilowatt-jam (kWh), jarak tempuh maksimum per pengisian (km), serta durasi pengisian daya baik dengan metode AC (lambat) maupun DC (cepat). Data dikompilasi dalam format CSV

dan dianalisis menggunakan perangkat lunak Python (versi 3.10), dengan memanfaatkan pustaka pandas untuk analisis data dan matplotlib untuk visualisasi grafik.

Asumsi dan Parameter

Untuk melakukan estimasi pengurangan emisi karbon, digunakan pendekatan perbandingan antara kendaraan listrik dan kendaraan berbahan bakar bensin. Nilai acuan emisi untuk kendaraan konvensional ditetapkan sebesar 0,231 kg CO₂ per km, berdasarkan asumsi konsumsi bahan bakar 10 km/liter dan emisi 2,31 kg CO₂/liter. Sementara itu, emisi kendaraan listrik diasumsikan sebesar 37,05% dari total emisi kendaraan berbahan bakar bensin untuk jarak yang sama (Cai et al., 2024).

Rumus untuk menghitung selisih pengurangan emisi karbon per km adalah reduksi Emisi (kg CO₂) = 0,231 - (0,231 × 0,3705). Hasil pengurangan ini kemudian dikalikan dengan 100 untuk mendapatkan estimasi pengurangan emisi per 100 km perjalanan (Will et al., 2024).

Dalam penelitian ini, data mengenai waktu pengisian daya kendaraan listrik dikumpulkan dengan mempertimbangkan durasi pengisian yang dimulai dari kondisi baterai sebesar 20% hingga mencapai 80% State of Charge (SoC). Rentang ini dipilih karena mencerminkan praktik pengisian yang optimal dan efisien secara teknis, serta umum digunakan dalam pengujian performa pengisian daya oleh industri otomotif dan studi akademik. Rentang SoC 20%–80% juga bertujuan untuk menghindari pengaruh ekstrem dari kondisi pengisian awal (SoC sangat rendah) dan pengisian penuh (hingga 100%) yang umumnya memerlukan waktu lebih lama karena perlambatan arus listrik pada fase akhir pengisian (Hernandez-Cedillo, 2022).

Proses pengisian dalam studi ini mencakup dua jenis metode pengisian yang berbeda berdasarkan infrastruktur dan kecepatan pengisian daya, yaitu pengisian lambat menggunakan AC portable charger (umumnya terhubung ke jaringan listrik rumah tangga), serta pengisian cepat menggunakan DC fast charging yang dirancang untuk mempercepat waktu pengisian dalam skala komersial atau publik. Kedua metode tersebut disesuaikan dengan karakteristik dan dukungan sistem pengisian masing-masing model kendaraan (Zeynali et al., 2022).

Informasi waktu pengisian diperoleh dari sumber data sekunder yang valid dan terpercaya, yaitu dokumentasi resmi pabrikan kendaraan, brosur teknis, serta spesifikasi produk yang dipublikasikan secara daring melalui situs web resmi produsen atau katalog kendaraan listrik yang telah diverifikasi. Dengan pendekatan ini, data yang digunakan dalam analisis mempertahankan akurasi teknis serta relevansi terhadap kondisi nyata penggunaan kendaraan listrik di lapangan (Kannapiran et al., 2022).

Klasifikasi Data

Untuk mendukung analisis komparatif, data kendaraan diklasifikasikan berdasarkan dua variabel utama, yaitu kapasitas baterai dan jarak tempuh maksimum (Sriabisha et al., 2025). Kategori kapasitas baterai dibagi menjadi:

Tabel. 1 Klasifikasi kapasitas baterai

Klasifikasi kapasitas baterai	Kapasitas baterai
Jarak Pendek	< 50 kWh
Jarak Menengah	50-70 kWh
Jarak Jauh	>70 kWh

Sementara klasifikasi jarak tempuh terbagi atas:

Tabel. 2 Klasifikasi jarak tempuh

Klasifikasi Jarak	Jarak tempuh
Jarak Pendek	< 200 km
Jarak Menengah	200-400 km
Jarak Jauh	>400 km

Klasifikasi ini digunakan untuk menganalisis perbedaan efisiensi pengurangan emisi dalam setiap kelompok.

Teknik Analisis

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif. Perhitungan rata-rata, deviasi standar, dan pengelompokan data digunakan untuk memahami pola efisiensi pengurangan emisi karbon (da Costa Oliveira Santos et al., 2025). Efisiensi juga dihitung berdasarkan rasio antara pengurangan emisi per 100 km terhadap kapasitas baterai kendaraan:

$$\text{Efisiensi Emisi per kWh} = \frac{\text{Reduksi Emisi per 100 km (kg CO}_2\text{)}}{\text{Kapasitas Baterai (kWh)}}$$

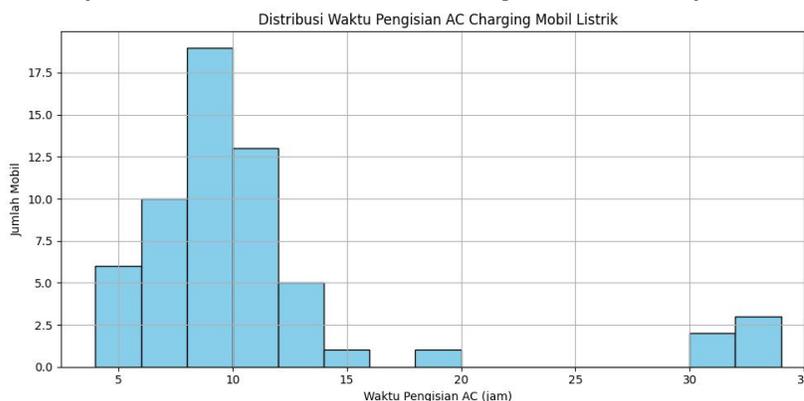
Seluruh hasil analisis divisualisasikan dalam bentuk grafik batang yang membandingkan efisiensi pengurangan emisi berdasarkan kelompok kapasitas baterai dan kategori jarak tempuh kendaraan listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Deskriptif

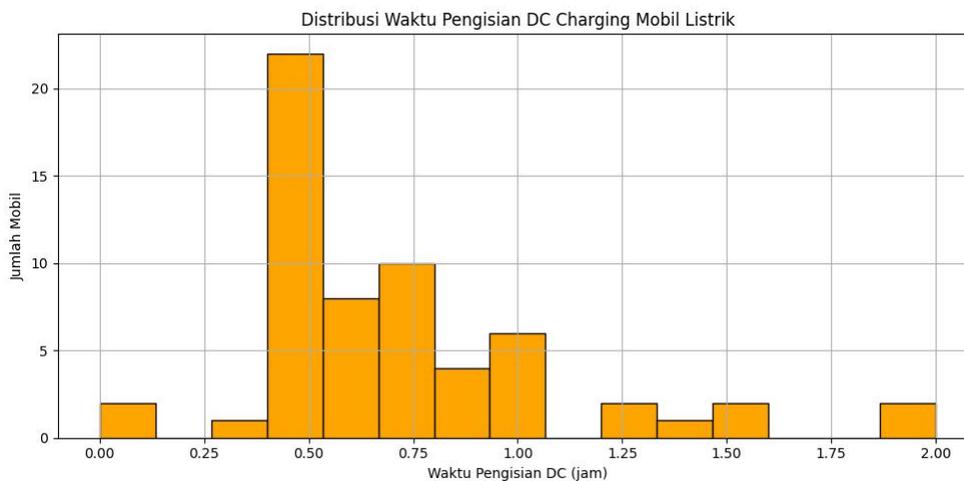
Analisis deskriptif dalam penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman umum mengenai karakteristik teknis kendaraan listrik yang dianalisis. Dataset yang digunakan mencakup 60 unit kendaraan listrik yang saat ini tersedia di pasar Indonesia, dengan variabel yang dianalisis meliputi kapasitas baterai, jarak tempuh maksimum, waktu pengisian daya menggunakan metode AC dan DC, serta estimasi potensi reduksi emisi karbon.

Kapasitas baterai kendaraan yang dianalisis menunjukkan kisaran antara 30,8 kWh hingga 111,2 kWh. Nilai rata-rata berada di angka 62,3 kWh, dengan standar deviasi sekitar 17,9 kWh, yang mengindikasikan adanya penyebaran nilai yang cukup luas antara kendaraan dengan baterai kecil, sedang, hingga besar. Secara kategorikal, sekitar 15% kendaraan termasuk dalam kelompok <50 kWh, 48% berada pada 50–70 kWh, dan 37% lainnya memiliki kapasitas >70 kWh.



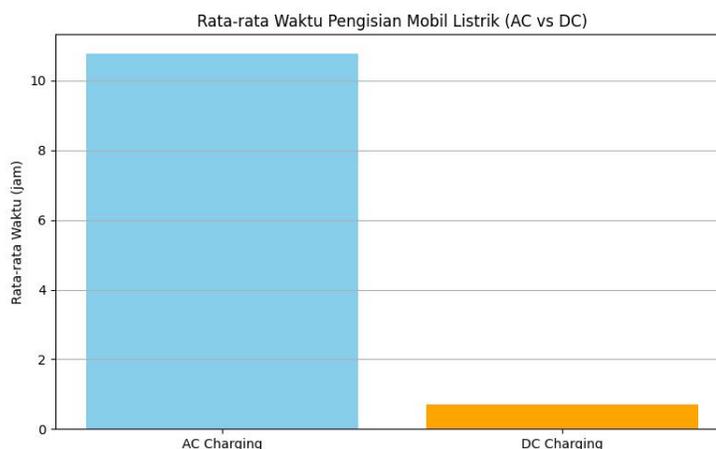
Gambar 1. Distribusi waktu pengisian AC Charging Mobil Listrik

Grafik pertama menyajikan perbandingan antara rata-rata durasi pengisian daya kendaraan listrik menggunakan dua jenis metode pengisian: AC Charging dan DC Fast Charging. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa waktu pengisian melalui AC Charging jauh lebih lama dibandingkan dengan metode DC, yaitu sekitar 10,8 jam, sedangkan pengisian dengan DC Charging memerlukan waktu rata-rata hanya 0,8 jam atau 48 menit. Perbedaan ini merefleksikan aspek teknis dari masing-masing sistem pengisian, di mana pengisian AC menggunakan arus bolak-balik standar rumah tangga (slow charging), sedangkan pengisian DC menggunakan arus searah bertegangan tinggi yang dirancang untuk kebutuhan pengisian cepat di fasilitas publik.



Gambar 2. Distribusi waktu pengisian DC Charging Mobil Listrik

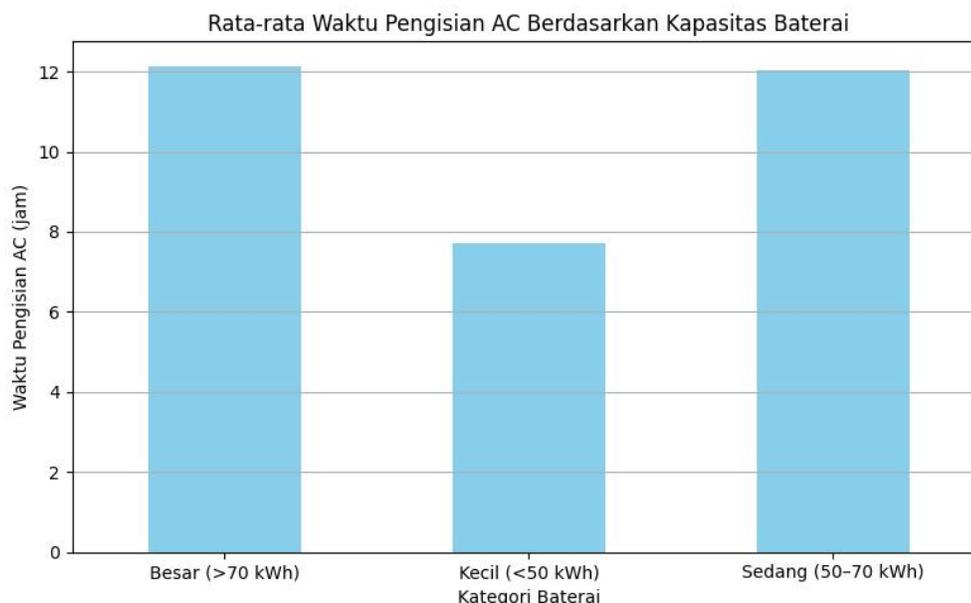
Grafik kedua menggambarkan distribusi jumlah kendaraan berdasarkan lama waktu pengisian menggunakan DC Charging. Sebagian besar kendaraan listrik memiliki durasi pengisian yang terkonsentrasi antara 0,4 hingga 1 jam, dengan puncak distribusi pada kisaran 0,5 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa mayoritas kendaraan yang mendukung fitur fast charging mampu mengisi daya dari 20% hingga 80% kapasitas baterai dalam waktu kurang dari satu jam. Meski demikian, terdapat pula beberapa kendaraan dengan waktu pengisian yang melebihi 1,5 jam, yang kemungkinan besar disebabkan oleh kapasitas baterai yang besar atau keterbatasan pada spesifikasi teknis sistem pengisian yang digunakan.



Gambar 3. Waktu pengisian Mobil Listrik

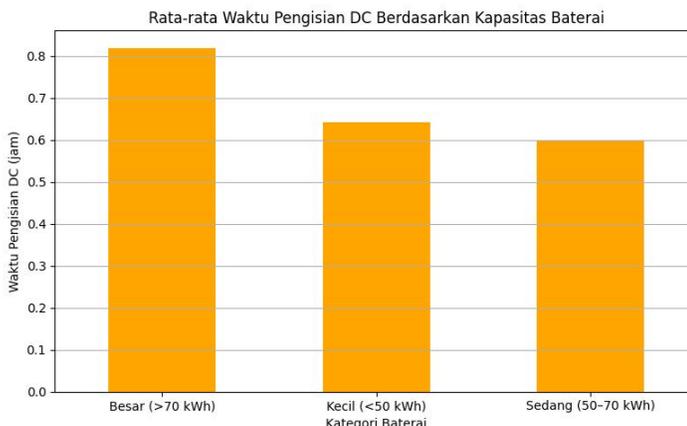
Pada grafik ketiga ditampilkan distribusi waktu pengisian daya untuk kendaraan listrik yang menggunakan AC Charging. Sebaran data menunjukkan bahwa sebagian besar kendaraan memiliki waktu pengisian dalam rentang 8 hingga 12 jam, yang merupakan kisaran umum untuk pengisian rumahan dengan kapasitas baterai sedang (sekitar 50–70 kWh). Namun demikian, terdapat juga sejumlah kendaraan dengan durasi pengisian lebih dari 30 jam, yang dapat dikaitkan dengan penggunaan baterai berkapasitas besar atau penggunaan sumber daya listrik berdaya rendah seperti colokan AC satu fase berdaya 2,2 kW.

Jarak maksimum yang dapat ditempuh kendaraan dalam satu kali pengisian penuh berkisar dari 180 km hingga 650 km. Rata-rata jarak tempuh tercatat sebesar 408 km, yang menunjukkan bahwa mayoritas kendaraan berada dalam kategori jarak jauh. Pembagian klasifikasi menunjukkan bahwa 18% kendaraan tergolong jarak pendek (<200 km), 32% termasuk jarak menengah (200–400 km), dan sebanyak 50% diklasifikasikan sebagai jarak jauh (>400 km).



Gambar 4. Rata-rata waktu pengisian AC berdasarkan kapasitas baterai

hasil perbandingan rata-rata waktu pengisian daya menggunakan metode AC Charging pada kendaraan listrik, yang diklasifikasikan berdasarkan kapasitas baterainya ke dalam tiga kelompok: kecil (<50 kWh), menengah (50–70 kWh), dan besar (>70 kWh). Secara umum, kendaraan dengan kapasitas baterai besar menunjukkan durasi pengisian yang paling lama, yakni sekitar 12,1 jam, diikuti oleh kategori baterai menengah yang mencatatkan waktu pengisian hampir serupa, yaitu 12 jam. Sebaliknya, kelompok kendaraan dengan baterai kecil memiliki waktu pengisian yang secara signifikan lebih pendek, yaitu rata-rata 7,8 jam. Temuan ini memperlihatkan kecenderungan bahwa semakin besar kapasitas baterai, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mengisi daya penuh menggunakan metode AC, yang biasanya menggunakan daya rendah seperti 2,2–3,3 kW. Adanya kesamaan waktu pengisian antara kategori baterai menengah dan besar juga dapat mengindikasikan variasi dalam sistem manajemen pengisian daya yang digunakan oleh masing-masing kendaraan.



Gambar 5. Rata-rata waktu pengisian DC berdasarkan kapasitas baterai

perbandingan rata-rata waktu pengisian dengan metode DC fast charging, menggunakan kategori kapasitas baterai yang sama. Rata-rata waktu pengisian untuk semua kelompok berada di bawah satu jam, dengan tren peningkatan waktu seiring bertambahnya kapasitas baterai. Kendaraan dalam kategori baterai besar menunjukkan rata-rata durasi pengisian DC sekitar 0,82 jam (± 49 menit). Kategori kecil mencatatkan rata-rata 0,65 jam (± 39 menit), sedangkan secara menarik, kategori menengah memiliki waktu pengisian tercepat yaitu 0,6 jam (± 36 menit). Hal ini dapat dijelaskan oleh kemungkinan optimalisasi sistem pengisian DC dan efisiensi termal pada kapasitas baterai menengah yang memungkinkan proses pengisian berlangsung lebih cepat.

Dari sisi waktu pengisian, metode AC portable charger menunjukkan rata-rata waktu pengisian sekitar 11,4 jam, dengan rentang waktu antara 6 hingga 16 jam tergantung pada kapasitas baterai dan efisiensi pengisian. Untuk metode pengisian cepat melalui DC fast charging, durasi rata-rata berada pada kisaran 48 menit atau setara 0,8 jam, dengan variasi waktu antara 30 hingga 90 menit.

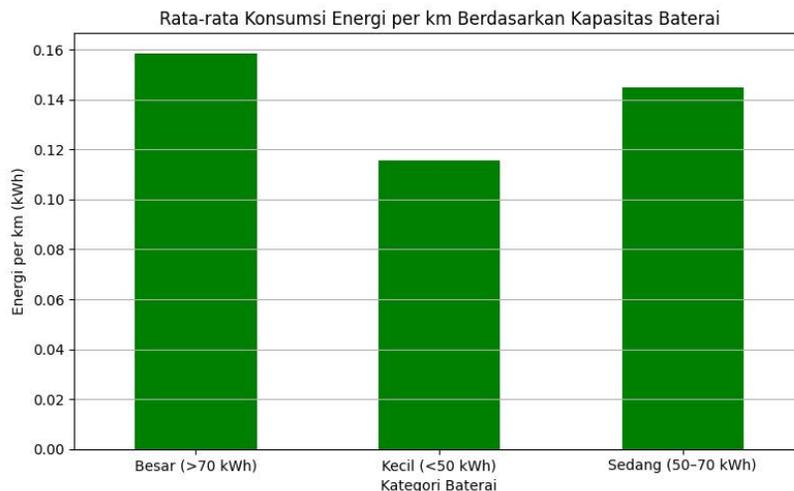
Perhitungan pengurangan emisi karbon dilakukan dengan membandingkan emisi kendaraan listrik terhadap kendaraan bensin, menggunakan standar 0,231 kg CO₂/km untuk kendaraan konvensional. Dengan asumsi bahwa EV hanya menghasilkan 37,05% dari emisi kendaraan bensin.

Hasil analisis pengurangan Karbon

Pengukuran konsumsi energi merupakan indikator utama dalam menilai tingkat efisiensi kendaraan listrik. Konsumsi energi yang lebih rendah menunjukkan performa yang lebih optimal dalam hal penggunaan daya untuk mobilitas. Dalam kajian ini, konsumsi energi dievaluasi melalui dua pendekatan, yaitu konsumsi energi per kilometer (kWh/km) dan konsumsi energi untuk jarak 100 km (kWh/100 km). Untuk memperoleh pemahaman yang lebih terstruktur, kendaraan diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok kapasitas baterai: rendah (<50 kWh), menengah (50–70 kWh), dan tinggi (>70 kWh).

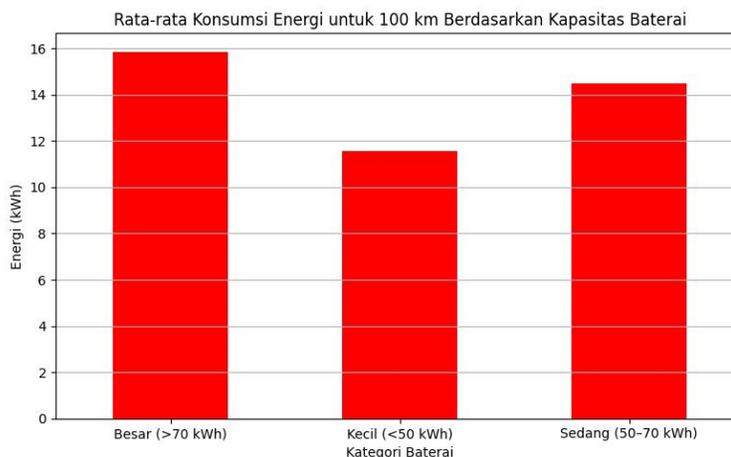
Tabel. 3 distribusi kapasitas baterai terhadap energi yang dikonsumsi

Kategori Baterai	AC Charging (jam)	DC Charging (jam)	Energi per km (kWh/km)	Energi untuk 100 km (kWh)
Besar (>70 kWh)	12.14	0.82	0.16	15.86
Sedang (50–70 kWh)	12.03	0.60	0.14	14.47
Kecil (<50 kWh)	7.72	0.64	0.12	11.58



Gambar 6. Rata-rata Konsumsi energi per KM

Nilai rata-rata konsumsi energi per kilometer untuk setiap kategori baterai. Nilai tertinggi tercatat pada kendaraan dengan baterai besar (>70 kWh) yaitu sekitar 0,159 kWh/km, diikuti oleh kelompok baterai sedang dengan 0,145 kWh/km, dan yang terendah pada kategori baterai kecil, sebesar 0,116 kWh/km. Data ini menunjukkan bahwa efisiensi energi cenderung menurun pada kendaraan dengan kapasitas baterai yang lebih besar. Hal ini memperkuat dugaan bahwa efisiensi kendaraan listrik bukan hanya dipengaruhi oleh kapasitas baterainya, tetapi juga oleh efisiensi motor, bobot total kendaraan, serta desain aerodinamis dan teknologi manajemen daya yang diadopsi.



Gambar 7. Rata-rata Konsumsi energi per 100 KM

Rerata konsumsi energi kendaraan listrik untuk setiap kategori kapasitas baterai dalam jarak tempuh 100 km. Terlihat bahwa kendaraan dengan kapasitas baterai besar (>70 kWh) memiliki tingkat konsumsi energi tertinggi, yaitu sekitar 15,9 kWh, disusul oleh kelompok baterai sedang (50–70 kWh) dengan konsumsi sekitar 14,5 kWh. Sementara itu, kendaraan dalam kategori kapasitas kecil (<50 kWh) menunjukkan konsumsi terendah, yakni sekitar 11,6 kWh per 100 km. Hasil ini menegaskan bahwa kapasitas baterai yang lebih besar umumnya berbanding lurus dengan konsumsi energi yang lebih tinggi. Kemungkinan penyebabnya meliputi bobot kendaraan yang lebih besar, dimensi fisik yang lebih luas, serta kebutuhan daya yang lebih tinggi untuk fitur-fitur tambahan yang biasanya ada pada kendaraan kelas atas.

Dalam hal pengurangan emisi karbon, penting untuk tidak hanya meninjau besarnya emisi karbon yang berhasil dikurangi per satuan jarak tempuh, tetapi juga mempertimbangkan kapasitas baterai sebagai sumber energi utama dari kendaraan listrik. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan pada penilaian efisiensi pengurangan emisi karbon melalui pendekatan rasio antara jumlah emisi yang dikurangi per 100 km dan total kapasitas baterai kendaraan. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengungkap perbedaan tingkat efisiensi di antara kelompok kendaraan dengan kapasitas baterai yang bervariasi, sekaligus memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara ukuran baterai, tingkat konsumsi energi, dan kontribusi kendaraan terhadap pengurangan emisi karbon. berikut adalah tabel hasil efisisensi emisi karbonnya.

Tabel. 4 karakteristik Kapasitas baterai dalam emisi karbon.

Kategori Kapasitas Baterai	Rata-rata Pengurangan Emisi per 100 km	Rata-rata Kapasitas Baterai (kWh)	Efisiensi Emisi (kg CO ₂ per kWh per 100 km)
Kecil (<50 kWh)	14.54 kg CO ₂	37.66 kWh	0.386 kg CO ₂ /kWh
Sedang (50–70 kWh)	14.54 kg CO ₂	62.32 kWh	0.233 kg CO ₂ /kWh
Besar (>70 kWh)	14.54 kg CO ₂	84.27 kWh	0.173 kg CO ₂ /kWh



Gambar 7. Total pengurangan Emisi CO₂ per 100km

Grafik yang ditampilkan menggambarkan total estimasi pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) per 100 kilometer berdasarkan tiga kategori jarak tempuh kendaraan listrik, yaitu jarak pendek (<200 km), jarak menengah (200–400 km), dan jarak jauh (>400 km). Dari hasil visualisasi, terlihat bahwa kendaraan listrik dengan jarak tempuh jauh memberikan kontribusi paling signifikan dalam pengurangan emisi karbon, dengan total pengurangan yang hampir mencapai 600 kg CO₂. Sementara itu, kelompok kendaraan jarak menengah menunjukkan kontribusi pengurangan emisi sekitar 260 kg CO₂, dan kelompok jarak pendek hanya menyumbang sekitar 20 kg CO₂.

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa kendaraan dengan daya jelajah lebih panjang tidak hanya memiliki kapasitas baterai yang lebih besar, tetapi juga lebih dominan secara kuantitatif dalam populasi kendaraan yang dianalisis. Hal ini menyebabkan akumulasi pengurangan emisi yang lebih besar. Selain itu, kendaraan jarak jauh umumnya digunakan dalam skenario mobilitas yang lebih intensif, sehingga potensi reduksi emisi karbonnya lebih tinggi. Sebaliknya, meskipun kendaraan jarak pendek cenderung lebih hemat energi, kontribusinya terhadap total pengurangan emisi relatif kecil karena keterbatasan jumlah dan jangkauan penggunaannya.

Dengan demikian, hasil ini memperkuat pentingnya pengembangan dan adopsi kendaraan listrik berjarak tempuh panjang yang tidak hanya unggul dalam performa teknis, tetapi juga memberikan dampak lingkungan yang lebih besar secara agregat. Dukungan terhadap infrastruktur pengisian daya dan kebijakan insentif bagi kendaraan jarak jauh menjadi hal krusial dalam upaya dekarbonisasi sektor transportasi secara efektif.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi konsumsi energi dan potensi pengurangan emisi karbon kendaraan listrik sangat dipengaruhi oleh kapasitas baterai, jarak tempuh, serta metode pengisian daya. Kendaraan dengan kapasitas baterai kecil terbukti memiliki efisiensi energi tertinggi, baik dalam hal konsumsi energi per kilometer maupun efisiensi pengurangan emisi per kilowatt-jam energi yang digunakan. Sebaliknya, kendaraan dengan kapasitas baterai besar mengonsumsi lebih banyak energi namun memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap total pengurangan emisi karbon secara agregat, terutama pada kendaraan dengan jarak tempuh lebih dari 400 km. Di sisi lain, waktu pengisian daya bervariasi secara signifikan antara metode AC dan DC, di mana pengisian menggunakan AC memerlukan waktu lebih lama dibandingkan DC fast charging yang lebih efisien. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas baterai, efisiensi konsumsi energi, waktu pengisian, dan dampak pengurangan emisi dalam perumusan strategi pengembangan kendaraan listrik yang berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Cai, J. *et al.* (2024) 'Predicting the carbon emission reduction potential of shared electric bicycle travel', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129(22). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104107>.
- da Costa Oliveira Santos, R. *et al.* (2025) 'Systematic Literature Review of electric vehicles within the expansion planning of electrical power systems', *Results in Engineering*, 25(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104500>.
-

- Dixon, J. *et al.* (2022) 'Vehicle to grid: driver plug-in patterns, their impact on the cost and carbon of charging, and implications for system flexibility', *eTransportation*, 13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100180>.
- Ev-Database (no date) https://ev-database.org/#group=vehicle-group&rs-pr=10000_100000&rs-er=0_1000&rs-ld=0_1000&rs-ac=2_23&rs-dcfc=0_300&rs-ub=10_200&rs-tw=0_2500&rs-ef=100_350&rs-sa=-1_5&rs-w=1000_3500&rs-c=0_5000&rs-y=2010_2030&s=1&p=0-10. Available at: https://ev-database.org/#group=vehicle-group&rs-pr=10000_100000&rs-er=0_1000&rs-ld=0_1000&rs-ac=2_23&rs-dcfc=0_300&rs-ub=10_200&rs-tw=0_2500&rs-ef=100_350&rs-sa=-1_5&rs-w=1000_3500&rs-c=0_5000&rs-y=2010_2030&s=1&p=0-10 (Accessed: 10 May 2025).
- Hernandez-Cedillo, M. (2022) 'Towards Smarter Electric Vehicle Charging with Low Carbon Smart Grids: Pricing and Control.' [etheses.dur.ac.uk](http://theses.dur.ac.uk). Available at: http://theses.dur.ac.uk/14625/1/Thesis_Monica_HC.pdf?DDD280+.
- Huber, J. (2021) 'Carbon efficient smart charging using forecasts of marginal emission factors', *Journal of Cleaner Production*, 284. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124766>.
- Kannapiran, E. *et al.* (2022) 'Smart electric vehicle charging station for residential complex', ... , *Intelligent ...* [Preprint]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9914182/>.
- Li, J., Zhang, Y. and Wang, X. (2025) 'Charging station localization and sizing determination considering smart charging strategies based on NSGA-III and MOPSO', *Sustainable Cities and Society*, 122(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106233>.
- Nguyen, H.T. and Choi, D.H. (2023) 'Distributionally robust model predictive control for smart electric vehicle charging station with V2G/V2V capability', *IEEE Transactions on Smart Grid* [Preprint]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10089877/>.
- Pod-point (no date) <https://pod-point.com/guides/vehicles?>, *Pod-point*. Available at: <https://pod-point.com/guides/vehicles?> (Accessed: 16 May 2025).
- Song, H. *et al.* (2023) 'Electric Vehicle Charging Management in Smart Energy Communities to Increase Renewable Energy Hosting Capacity', *2023 11th International ...* [Preprint]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10213800/>.
- Sriabisha, R. *et al.* (2025) 'A comprehensive exploration of electric vehicles: Classification, charging methods, obstacles, and approaches to optimization', *Energy for Sustainable Development*, 85(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101671>.
- Syla, A. *et al.* (2024) 'Optimal capacity planning for the electrification of personal transport: The interplay between flexible charging and energy system infrastructure', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192(November 2023). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114214>.
- Tu, R. *et al.* (2020) 'Electric vehicle charging optimization to minimize marginal greenhouse gas emissions from power generation', *Applied Energy*, 277(June 2020), p. 115517. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115517>.
- Will, C. *et al.* (2024) 'Can electric vehicle charging be carbon neutral? Uniting smart charging and renewables', *Applied Energy* [Preprint]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924009322>.
- Wu, Y. *et al.* (2025) 'Market scheduling of emission-aware smart prosumers in smart grids: A multi-objective bi-level approach', *Applied Energy*, 389(February), p. 125745. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125745>.

- Zeynali, S. *et al.* (2022) 'The role of smart electric vehicle charging in optimal decision-making of the active distribution network', ... *via Smart Charging* ... [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05909-4_9.
- Zhang, Y. (2020) 'Research on Electric Vehicle Smart Charging Strategy on Carbon Emission Minimization', *Zhongguo Dianli/Electric Power*, 53(4), pp. 147–154. Available at: <https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201812092>.