

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

([Meng et al., 2024](#)) mengatakan pelepasan karbon secara global menyentuh angka sekitar 33 miliar ton sepanjang tahun 2022. Sektor transportasi menyumbangkan 8,2 miliar ton dari total emisi secara global atau 24,8%. Besarnya ketergantungan terhadap sumber energi fosil ini memicu tantangan berat bagi upaya penurunan emisi demi merealisasikan pembangunan berkelanjutan. Kondisi tersebut mendorong banyak negara mempercepat proses beralih ke moda transportasi yang hemat emisi. Penerapan aturan emisi yang ketat, perluasan pemanfaatan energi bersih, serta integrasi kendaraan listrik menjadi bentuk tindakan nyata yang dijalankan ([Meng et al., 2024](#)).

Indonesia sebagai negara berkembang menghadapi persoalan serupa dalam menekan lonjakan emisi gas rumah kaca saat kebu-
tuhan mobilitas dan pasokan energi warga terus naik. Data menunjukkan volume emisi nasional merambat naik, dari angka 1,13 GtCO₂e pada tahun 1990 menjadi 1,48 GtCO₂e pada tahun 2021 ([Massagony et al., 2025](#)). Sektor energi mendominasi kontribusi emisi domestik dengan angka 44% pada tahun 2020, lalu meningkat hingga 46% pada tahun 2021 dan transportasi jalan berada di dalam kontribusi tersebut ([Massagony et al., 2025](#)). Guna menanggulangi ancaman krisis ini sekaligus memenuhi kewajiban dalam *Paris Agreement*, Indonesia menetapkan sasaran *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 ([Kanugrahan & Hakam, 2023](#)). Dinamika pertumbuhan ekonomi, laju urbanisasi, serta aktivitas pergerakan harian masyarakat terus mendorong kenaikan pemakaian energi di sektor transportasi ([Nasir & Bengi, 2024](#)).

Kendaraan listrik hadir sebagai langkah strategis untuk menekan emisi transportasi jalan sekaligus menuntaskan transisi energi di Indonesia. Penerapan teknologi ini di tingkat yang masih membentur pada berbagai hambatan nyata. Penggunaan kendaraan konvensional berbasis fosil yang masih dominan membuat akumulasi emisi karbon sektor transportasi terus membengkak setiap tahun.

([Massagony et al., 2025](#)) mengatakan kendala utama pencapaian NZE di Indonesia berakar pada masalah tata kelola lembaga, hambatan teknis, keterbatasan dana, serta rumitnya proses dekarbonisasi pada sektor transportasi jalan yang ada di Indonesia. ([Massagony et al., 2025](#)) mengatakan bahwa tingkat ketergantungan yang tinggi pada energi fosil menuntut penetapan arah kebijakan transisi energi yang tegas, terencana, dan terhubung lintas sektor.

Model LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*) dapat dipakai untuk mengukur dampak penggunaan kendaraan listrik terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. ([Meng et al., 2024](#)) mengatakan bahwa model LEAP sanggup untuk memproyeksikan pola pemakaian energi dan arah emisi berdasarkan bermacam opsi kebijakan transportasi masa depan. Hasil studi ([Meng et al., 2024](#)) membuktikan bahwa perancangan skenario kebijakan kendaraan listrik secara terpadu mampu memangkas emisi sampai 66% jika dibandingkan dengan skenario *Business as Usual* (BaU). Sejalan dengan itu ([Kanugrahan & Hakam, 2023](#)) menerapkan model LEAP dalam mensimulasikan beragam skenario transisi energi nasional demi mencapai target NZE 2060. Pendekatan skenario lewat LEAP sangat tepat dipakai untuk menilai proyeksi penggunaan kendaraan listrik pada moda transportasi jalan di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan menganalisis berbagai skenario penggunaan kendaraan listrik untuk mengurangi pelepasan emisi GRK pada sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060. Hasil dari studi ini diharapkan memberi perhitungan empiris mengenai daya pangkas emisi pada tiap opsi skenario elektrifikasi pada sektor transportasi. Luaran penelitian ini dapat dipakai sebagai acuan ilmiah serta bahan pertimbangan bagi penyusun kebijakan dan pemerintah dalam merancang ekosistem transportasi berkelanjutan demi memenuhi sasaran NZE Indonesia tahun 2060 yang sudah ditetapkan ([Kanugrahan & Hakam, 2023](#)) dan ([Massagony et al., 2025](#)).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Sejauh mana perkembangan dan penerapan kendaraan listrik pada sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060 berdasarkan skenario Business as Usual (BaU), Moderat, dan Radikal?
2. Bagaimana perubahan konsumsi energi sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060 sebagai dampak dari peningkatan penerapan kendaraan listrik pada skenario BaU, Moderat, dan Radikal?
3. Skenario penerapan kendaraan listrik manakah yang menghasilkan potensi penurunan emisi CO₂ langsung paling besar pada sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsumsi energi dan emisi CO₂ sektor transportasi jalan hingga tahun 2060 melalui beberapa skenario penerapan kendaraan listrik.

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi perkembangan dan tingkat penerapan kendaraan listrik pada sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060 berdasarkan skenario Business as Usual (BaU), Moderat, dan Radikal.
2. Mengevaluasi perubahan kebutuhan dan komposisi konsumsi energi sektor transportasi jalan hingga tahun 2060 akibat peningkatan penetrasi kendaraan listrik pada masing-masing skenario.
3. Menentukan skenario penerapan kendaraan listrik yang paling efektif dalam menurunkan emisi CO₂ langsung sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060 melalui perbandingan hasil pemodelan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pengembangan transportasi rendah karbon di Indonesia melalui hasil proyeksi dan analisis skenario. Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Menjadi sumber informasi mengenai perkembangan dan tingkat penetrasi kendaraan listrik pada sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060, khususnya berdasarkan skenario BaU, Moderat, dan Radikal.
2. Mendukung perencanaan kebutuhan energi sektor transportasi melalui gambaran perubahan penggunaan *gasoline*, diesel, dan *electricity* sebagai konsekuensi dari peningkatan penetrasi kendaraan listrik.
3. Menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah dan pemangku kepentingan dalam menentukan arah kebijakan transportasi yang berpotensi menghasilkan penurunan emisi CO₂ paling efektif hingga tahun 2060.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Untuk menjaga fokus dan keterarahan penelitian, diperlukan ruang lingkup dan batasan yang menjadi dasar dalam pelaksanaan analisis. Adapun ruang lingkup dan batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kajian ini terfokus pada evaluasi dampak adopsi kendaraan listrik terhadap pola kebutuhan energi dan besaran emisi GRK khusus pada sektor transportasi jalan di Indonesia.
2. Objek penelitian hanya mencakup moda transportasi darat berbasis jalan raya dan menyampingkan jenis transportasi non-jalan seperti angkutan laut, penerbangan, serta moda kereta api.
3. Proyeksi analisis membentang hingga kurun waktu 2060 dengan menerapkan formulasi tiga skenario utama, yakni skenario BAU, moderat dan radikal.
4. Pemodelan sistem dilakukan memakai perangkat lunak LEAP yang didukung masukan data sekunder dari publikasi jurnal ilmiah, laporan resmi kementerian, serta basis data statistik nasional.
5. Estimasi emisi GRK yang dihitung sebatas emisi operasional dari konsumsi energi kendaraan jalan raya (*tank-to-wheel*), tanpa memperhitungkan rantai emisi dari manufaktur kendaraan, produksi sel baterai, maupun pemrosesan limbah baterai.
6. Penelitian ini menekankan pada kalkulasi proyeksi energi dan estimasi potensi reduksi emisi GRK, sehingga tidak mengkaji dimensi kelayakan

ekonomi secara mendalam seperti aspek investasi, analisis pasar, maupun margin keuntungan finansial.

1.6 Metode Penelitian

Penelitian ini mengandalkan perangkat lunak *Low Emissions Analysis Platform* (LEAP) sebagai instrumen pemodelan untuk mengkaji dinamika konsumsi energi dan pelepasan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada sektor transportasi jalan. Pemilihan *platform* LEAP didasari oleh kapabilitasnya dalam mensimulasikan beragam skenario kebijakan energi serta menguantifikasi dampak lingkungannya secara terstruktur dan terintegrasi. *Platform* ini telah teruji secara luas dalam riset transisi energi global dan perencanaan sistem mobilitas berkelanjutan. Integrasi data ke dalam LEAP memungkinkan penyusunan proyeksi emisi secara presisi seiring dengan skema akselerasi adopsi kendaraan listrik di masa depan.

Proses analisis pemodelan mengandalkan ketersediaan data sekunder kuantitatif yang dihimpun dari publikasi resmi dan lembaga otoritatif. Basis data utama disintesis dari publikasi statistik armada Badan Pusat Statistik (BPS), neraca energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), parameter operasional Kementerian Perhubungan, serta standar teknologis dari *International Energy Agency* (IEA). Guna melengkapi validitas dan kedalaman analisis, penelitian ini menyerap referensi pendukung dari artikel jurnal ilmiah bereputasi serta laporan riset tematik mengenai transisi energi, transportasi darat, dan metodologi inventarisasi emisi GRK.

Data populasi kendaraan yang terkumpul dikonsolidasikan sebagai parameter acuan untuk merepresentasikan kondisi awal (*baseline condition*) sektor transportasi jalan pada tahun dasar 2025. Input kuantitas moda diintegrasikan berdasarkan jenis kendaraan dan cakupan wilayah studi, yang dibedakan secara spesifik antara kendaraan konvensional bermesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dan kendaraan bermotor berbasis listrik (*battery electric vehicle*). Data kendaraan konvensional difungsikan untuk mengkalkulasi besaran aktivitas mobilitas yang mengonsumsi bahan bakar fosil, sedangkan data moda

listrik digunakan untuk menentukan titik awal penetrasi pasar (*initial market penetration rate*) dalam sistem transportasi darat.

Dalam kerangka kerja LEAP, populasi awal tersebut dipadukan dengan variabel laju pertumbuhan kendaraan untuk memproyeksikan akumulasi armada selama periode 2026 hingga 2060. Pemodelan menerapkan laju pertumbuhan yang terpisah antara kendaraan konvensional dan kendaraan listrik guna menggambarkan dinamika pergeseran struktur populasi moda secara realistis selama proses transisi energi. Asumsi pertumbuhan yang dimasukkan ke dalam algoritma LEAP menentukan volume aktivitas transportasi (*vehicle-kilometers traveled*), yang berimplikasi langsung terhadap profil kebutuhan energi total dan besaran emisi CO₂ yang dihasilkan.

1.7 Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini menyajikan proyeksi perkembangan sektor transportasi jalan di Indonesia hingga tahun 2060 melalui skema percepatan adopsi kendaraan bermotor berbasis listrik (*battery electric vehicle*). Pemodelan dikonstruksi memanfaatkan instrumen *Low Emissions Analysis Platform* (LEAP) dengan menetapkan tahun 2026 sebagai titik acuan (*baseline condition*). Keluaran simulasi memberikan gambaran kuantitatif mengenai dinamika pergeseran komposisi antara armada konvensional bermesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dan kendaraan listrik, serta implikasi langsungnya terhadap struktur konsumsi energi dan pelepasan emisi karbon dioksida (CO₂).

Hasil komputasi dan analisis disajikan secara terstruktur melalui tiga trajektori utama, yaitu skenario *Business as Usual* (BaU), Moderat, dan Radikal. Skenario BaU memodelkan lintasan pertumbuhan tanpa intervensi kebijakan agresif, di mana adopsi kendaraan listrik berjalan secara konservatif mengikuti *trend* alamiah pasar. Skenario Moderat mensimulasikan akselerasi penetrasi moda listrik yang diselaraskan dengan target regulasi serta peta jalan dekarbonisasi pemerintah. Sementara itu, skenario Radikal memosisikan tingkat adopsi pada batas atas (*upper-bound scenario*) untuk menguji potensi efisiensi maksimum dari akselerasi transisi energi.

Melalui ketiga skenario penelitian ini memproyeksikan kebutuhan energi sektor transportasi darat hingga horizon waktu 2060. Pergeseran bauran armada secara langsung merestrukturisasi profil penyerapan energi nasional. Peningkatan populasi kendaraan listrik terbukti menekan laju konsumsi bahan bakar fosil (*gasoline* dan *diesel*) secara drastis, yang diiringi oleh lonjakan pertumbuhan permintaan daya *electricity* untuk menopang mobilitas transportasi jalan.

Proyeksi emisi CO₂ yang dihasilkan difungsikan sebagai parameter evaluasi utama untuk mengukur magnitudo penurunan emisi pada tiap-tiap skenario. Komparasi lintas skenario mengonfirmasi tingkat efektivitas substitusi bahan bakar fosil oleh moda berbasis listrik dalam mereduksi jejak karbon sektor transportasi. Perbedaan akumulasi emisi antara skenario BaU, moderat, dan radikal memberikan bukti empiris mengenai kontribusi akselerasi elektrifikasi kendaraan terhadap pencapaian target dekarbonisasi.

Hasil penelitian ini menegaskan skenario adopsi kendaraan listrik yang paling optimal dan efektif dalam memangkas akumulasi emisi CO₂ sektor transportasi jalan hingga tahun 2060. Temuan kuantitatif ini diharapkan dapat menjadi rujukan ilmiah serta bahan pertimbangan strategis bagi pemangku kebijakan dalam merumuskan kerangka regulasi, insentif transisi energi, dan peta jalan pengembangan ekosistem kendaraan listrik yang berkelanjutan di Indonesia.