

SIMULASI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA MELALUI PERALIHAN MODA KE BUS LISTRIK DI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN LAJU DEFORESTASI

Dwi Budi Winarno^{1*}, Ni Nyoman Nepi Marleni¹, Johan Syafri Mahathir Ahmad^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Contact Person: dwibudiwinarno@mail.ugm.ac.id; johan.syafri.ma@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak skenario peralihan moda transportasi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), dengan mempertimbangkan pengaruh perubahan tutupan lahan yang salah satunya adalah deforestasi sebagai parameter perubahan pada tutupan lahan. Dalam penelitian ini skenario utama yang dikaji adalah, peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik dengan tingkat deforestasi 2% sebagai parameter pengaruh perubahan tutupan lahan. Analisis dilakukan secara kuantitatif berdasarkan pemodelan emisi sektoral dan efisiensi biaya mitigasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada skenario deforestasi 2%, total emisi pada tahun 2024 mencapai 5.901,21 Gg CO₂-eq, dengan sektor energi dan pertanian sebagai penyumbang utama emisi, sementara sektor kehutanan menunjukkan peran penting sebagai penyerap karbon. Penerapan skenario peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik mampu menurunkan emisi sebesar 8,49% (tanpa deforestasi) dan 7,37% (dengan deforestasi), dengan biaya mitigasi berkisar Rp8,7–10 juta per Gg CO₂-eq. Temuan ini menunjukkan bahwa elektrifikasi transportasi merupakan strategi transisi energi yang efektif dan efisien di wilayah urban seperti DIY, terutama jika didukung dengan kebijakan konservasi kawasan hijau. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam mendukung perencanaan pembangunan rendah karbon berbasis integrasi lintas sektor.

KATA KUNCI emisi gas rumah kaca, elektrifikasi transportasi, deforestasi, transisi energi.

1 PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan tantangan global yang mendesak untuk segera diatasi. Salah satu penyebab utama perubahan iklim adalah meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer, yang sebagian besar berasal dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, perubahan penggunaan lahan, dan deforestasi. Sektor transportasi, sebagai salah satu penyumbang utama emisi GRK, memegang peranan penting dalam upaya mitigasi emisi di tingkat lokal maupun nasional. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), sektor transportasi menyumbang sekitar 23% dari total emisi GRK nasional pada tahun 2020, hal tersebut meningkat menjadi 27% pada tahun 2023 berdasarkan laporan dari *World Resources Institute* (WRI) Indonesia.

Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) sebagai wilayah perkotaan dengan kepadatan penduduk yang tinggi dan tingkat pertumbuhan kendaraan bermotor yang signifikan menghadapi tantangan besar dalam pengendalian emisi GRK. Berdasarkan proyeksi BPS, jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar 283,5 juta jiwa, dengan tingkat kepadatan nasional sebesar 156 jiwa/km². Khusus di wilayah perkotaan seperti DIY, kepadatan ini jauh lebih tinggi, seiring dengan meningkatnya proporsi penduduk yang tinggal di kawasan urban yang mencapai 59% pada tahun 2024. Peningkatan jumlah penduduk ini berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan mobilitas, yang tercermin dari tingginya angka pertumbuhan kendaraan bermotor. Data dari Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (Gaikindo) mencatat bahwa produksi kendaraan nasional pada tahun 2024 mencapai sekitar 1,19 juta unit, dengan total penjualan retail sebanyak 865.723 unit. Meski sempat mengalami penurunan pada awal tahun, penjualan kendaraan kembali meningkat sebesar 2,2% (YoY) pada Februari 2025. Berdasarkan data Dinas Perhubungan DIY, jumlah kendaraan bermotor meningkat secara konsisten setiap tahun. Pada tahun 2023 jumlah kendaraan bermotor di DIY sebanyak 1.308.270-unit hal tersebut meningkat menjadi 1.325.628-unit pada tahun 2024. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor tersebut berdampak pada meningkatnya emisi karbon serta penurunan kualitas udara. Di sisi lain, DIY juga memiliki kawasan hutan yang berfungsi sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) yang dapat membantu menyeimbangkan emisi dari sektor lain.

Transisi menuju moda transportasi rendah emisi seperti kendaraan listrik menjadi salah satu strategi yang diprioritaskan dalam upaya pengurangan emisi di sektor transportasi. Strategi ini sejalan dengan komitmen Indonesia dalam Perjanjian Paris untuk mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 atau lebih cepat. Namun, kebijakan transisi energi perlu dirancang dengan mempertimbangkan keterkaitan lintas sektor, termasuk interaksi antara transportasi dan penggunaan lahan. Perspektif IPCC (2022) menunjukkan bahwa perencanaan spasial yang mengintegrasikan lima fitur pembangunan perkotaan (5Ds) secara signifikan dapat mengurangi perjalanan individu (VMT/VKT) dan emisi GRK di sektor transportasi.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi dampak elektrifikasi transportasi terhadap pengurangan emisi. Sihotang et al. (2021) menunjukkan bahwa konversi moda transportasi ke kendaraan listrik dapat menurunkan emisi hingga 10–15% di wilayah perkotaan. Nguyen et al. (2020) menganalisis efisiensi biaya dari adopsi bus listrik di Vietnam (Hanoi) dengan tingkat kepadatan penduduk sebanyak 2.585 orang/km² berdasarkan data tahun 2024 dan menunjukkan bahwa intervensi ini dapat efektif secara ekonomi apabila didukung dengan perencanaan yang matang. Di sisi lain, studi BAPPENAS (2019) dalam kerangka *Low Carbon Development Initiative* (LCDI) menegaskan bahwa pengurangan emisi yang optimal hanya dapat dicapai melalui pendekatan lintas sektor yang terintegrasi, seperti pada sektor energi, transportasi, tata guna lahan, kehutanan, dan pertanian. Sebagai contoh, pengembangan transportasi publik rendah emisi perlu disinergikan dengan perlindungan kawasan hutan sebagai penyerap karbon serta perencanaan tata ruang yang mencegah perluasan pemukiman ke area hijau. Namun demikian, terdapat kesenjangan dalam penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya masih terfokus pada analisis sektoral semata tanpa mengintegrasikan faktor perubahan penggunaan lahan seperti deforestasi dalam model evaluasi emisi. Selain itu, kajian di tingkat provinsi, khususnya untuk wilayah dengan karakteristik seperti DIY yang memiliki keseimbangan antara kawasan perkotaan padat dan kawasan konservasi, masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan mengkaji dampak skenario peralihan moda transportasi terhadap penurunan emisi GRK di DIY, dengan mempertimbangkan kondisi perubahan tutupan lahan akibat deforestasi sebagai salah satu faktor perubahannya. Salah satu fokus utama penelitian adalah peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik yang menitikberatkan pada elektrifikasi transportasi dan peralihan kendaraan pribadi ke transportasi umum. Evaluasi dilakukan dengan pendekatan kuantitatif terhadap besaran emisi yang dihasilkan dan efisiensi biaya yang diperlukan untuk mencapai penurunan tersebut. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan masukan kebijakan yang aplikatif bagi perencanaan pembangunan rendah karbon di tingkat daerah.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menganalisis dampak skenario peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik terhadap penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) di Provinsi DIY. Metode yang digunakan melibatkan pemodelan emisi berbasis aktivitas (*activity-based emission modeling*) yang disesuaikan dengan skenario perubahan moda transportasi dan kondisi deforestasi. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Jumlah dan jenis kendaraan bermotor di DIY tahun 2023 berdasarkan data Dinas Perhubungan DIY.
- Faktor emisi kendaraan berdasarkan jenis bahan bakar dari IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* volume 2: Energi pada Chapter 3 terkait dengan *Mobile Combustion* (2006).
- Data konversi moda transportasi pribadi ke kendaraan umum dan kendaraan listrik sesuai rencana skenario yang disimulasikan.
- Data tutupan lahan dan tingkat deforestasi dari BPS dan KLHK.
- Data biaya investasi kendaraan listrik dan infrastruktur transportasi dari Kementerian Perhubungan dan laporan proyek *Buy the Service* (BTS).

Terdapat dua kondisi skenario yang dianalisis:

- Kondisi 1: Tanpa deforestasi (0%).
- Kondisi 2: Dengan deforestasi sebesar 2% per tahun.

Estimasi penurunan emisi dilakukan berdasarkan selisih antara total emisi sebelum dan sesudah skenario diterapkan. Biaya investasi yang dibutuhkan untuk implementasi skenario dihitung berdasarkan harga pasar kendaraan listrik dan estimasi biaya infrastruktur transportasi umum. Perhitungan emisi GRK dilakukan dalam satuan Gg CO₂-eq menggunakan rumus umum:

$$Emisi (Gg CO_2 - Eq) = A \times EF (kg CO_2/liter) \quad (1)$$

Dimana Emisi adalah emisi GRK dalam satuan Gigagram CO₂-eq, A adalah aktivitas (jumlah kendaraan × jarak tempuh tahunan), dan EF adalah *Emission Factor* berdasarkan jenis kendaraan dan bahan bakar (kg CO₂/km).

Analisis data dilakukan secara kuantitatif melalui langkah-langkah berikut:

- Kalkulasi Emisi Awal (BAU/Baseline): Menghitung total emisi harian kendaraan pribadi berdasarkan jumlah kendaraan dan konsumsi bahan bakar per jenis kendaraan.
- Simulasi Skenario Konversi: Menghitung jumlah kendaraan yang beralih ke transportasi umum atau alternatif sesuai dengan masing-masing skenario, kemudian memperkirakan konsumsi bahan bakar dan emisi yang dapat dihindari.
- Estimasi Emisi Baru: Menghitung emisi baru yang dihasilkan dari penggunaan bus Trans Jogja berdasarkan jarak tempuh, jumlah rotasi, dan konsumsi bahan bakar solar.
- Penghitungan Reduksi Emisi: Menghitung selisih emisi sebelum dan sesudah konversi untuk setiap skenario.
- Analisis Biaya Implementasi: Mengestimasi total biaya operasional subsidi berdasarkan kilometer tempuh seluruh armada dalam masing-masing skenario.
- Evaluasi Efisiensi Biaya: Membandingkan besarnya reduksi emisi terhadap biaya yang dikeluarkan pada setiap skenario untuk menentukan opsi yang paling *cost-effective*.

Penyesuaian terhadap faktor perubahan tutupan lahan dilakukan dengan menggunakan asumsi deforestasi sebagai parameter perubahan tutupan lahan berdasarkan data deforestasi selama dua puluh tahun terakhir. Penurunan fungsi hutan sebagai penyerap karbon dihitung dengan mengurangi kemampuan serapan karbon tahunan berdasarkan rata-rata emisi yang diserap oleh hutan tropis (sekitar 200 ton CO₂/ha/tahun) sebagaimana disebutkan dalam studi Kurnianto et al. (2020). Analisis efisiensi biaya dilakukan dengan membagi total biaya investasi dengan total emisi yang berhasil dikurangi, sehingga diperoleh satuan Rp/Gg CO₂-eq. Interpretasi hasil dilakukan secara komparatif antara kondisi baseline dan skenario intervensi. Seluruh simulasi dilakukan menggunakan lembar kerja Excel berbasis model emisi sektoral, dan hasil divisualisasikan dalam bentuk grafik serta tabel untuk mempermudah analisis kebijakan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

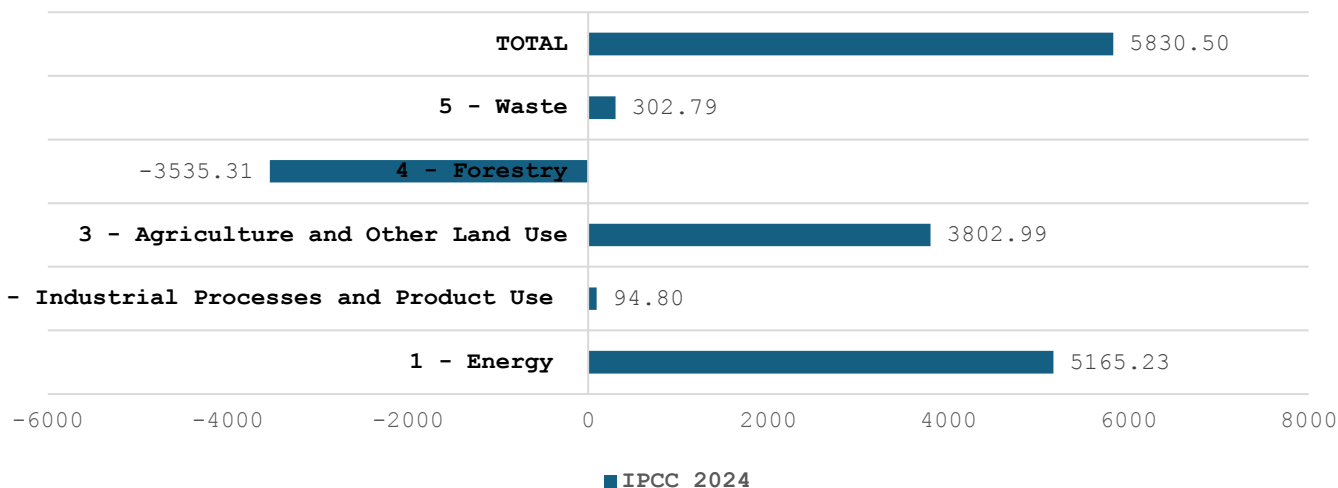
Berdasarkan data hasil simulasi dengan menggunakan program dari IPCC pada tahun 2024 dengan skenario deforestasi sebesar 2%, total emisi gas rumah kaca (GRK) di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta mencapai 5.901,21 Gg CO₂-eq. Nilai ini terdiri atas beberapa komponen penyumbang utama, antara lain: sektor energi sebesar 5.165,23 Gg CO₂-eq, sektor limbah 94,80 Gg CO₂-eq, sektor pertanian 3.802,99 Gg CO₂-eq, dikurangi dengan serapan karbon dari sektor kehutanan sebesar -3.464,60 Gg CO₂-eq, serta kontribusi tambahan dari sektor industri proses dan penggunaan produk (IPPU) sebesar 302,79 Gg CO₂-eq.

Meskipun sektor kehutanan berperan penting sebagai penyerap emisi, laju deforestasi sebesar 2% menyebabkan penurunan kapasitas serapan karbon secara signifikan, sehingga emisi bersih tetap tinggi. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Kurnianto et al. (2020), yang menyatakan bahwa hutan sekunder di Pulau Jawa mampu menyerap sekitar 200-ton CO₂ per hektar per tahun. Namun, dengan penurunan tutupan lahan tahunan sebesar 2%, kemampuan ini terus menurun, dan tidak lagi cukup untuk mengimbangi emisi yang dihasilkan dari sektor lain. Dalam konteks ini, strategi mitigasi perubahan iklim tidak dapat bertumpu pada satu sektor saja, melainkan harus bersifat lintas sektor, sebagaimana disarankan dalam laporan LCDI (BAPPENAS, 2019).

Kontribusi negatif sektor kehutanan ini menandakan bahwa kawasan hutan di DIY berfungsi secara efektif sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) dan memainkan peran vital dalam mengimbangi emisi dari sektor-sektor lain seperti energi dan limbah. Hal ini didukung oleh temuan Widayati & Kuncahyo (2020), yang menunjukkan bahwa hutan rakyat di Kabupaten Gunungkidul memiliki potensi penyerapan karbon yang tinggi jika dikelola dengan prinsip keberlanjutan dan konservasi. Penelitian lain oleh Nurwita et al. (2022) juga menyebutkan bahwa meskipun luas hutan di DIY tidak sebesar provinsi lain, karakteristik tutupan lahannya yang relatif stabil serta rendahnya tingkat deforestasi menjadikannya penyerap karbon yang signifikan.

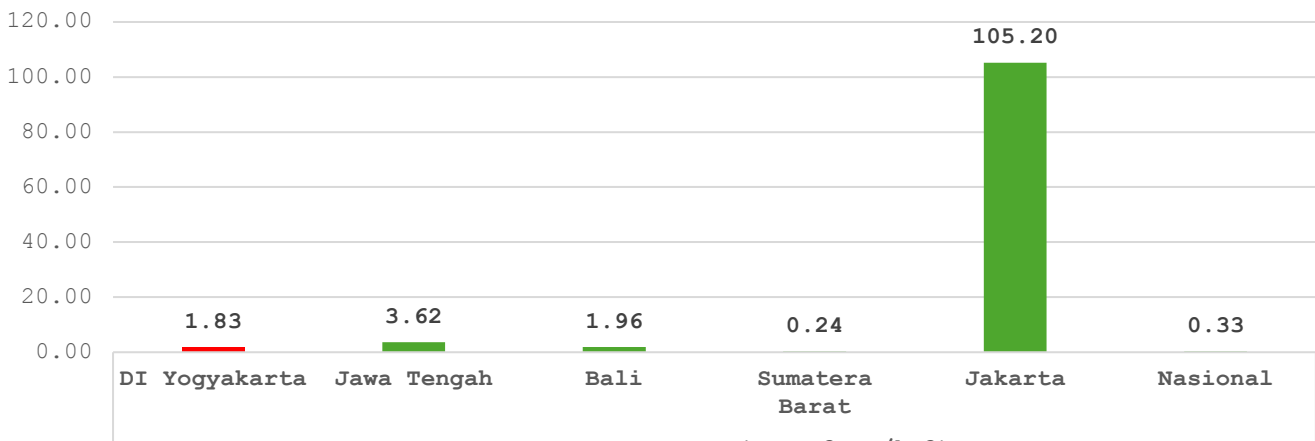
Sebaliknya, sektor energi merupakan penyumbang emisi terbesar di DIY, dengan kontribusi lebih dari 5.000 Gg CO₂-eq yang berasal dari konsumsi energi pada sektor transportasi, permukiman, dan industri. Mitigasi emisi dari sektor ini menjadi sangat krusial, mengingat pertumbuhan kendaraan bermotor di DIY mencapai 1,3% per tahun dan terus mengalami peningkatan. Data dari Dinas Perhubungan DIY mencatat bahwa pada tahun 2023 terdapat lebih dari 700

ribu kendaraan roda dua dan lebih dari 100 ribu kendaraan roda empat yang aktif beroperasi. Peningkatan jumlah kendaraan ini mendorong konsumsi bahan bakar fosil secara signifikan, sehingga berkontribusi langsung terhadap peningkatan emisi GRK, khususnya dari subsektor transportasi.



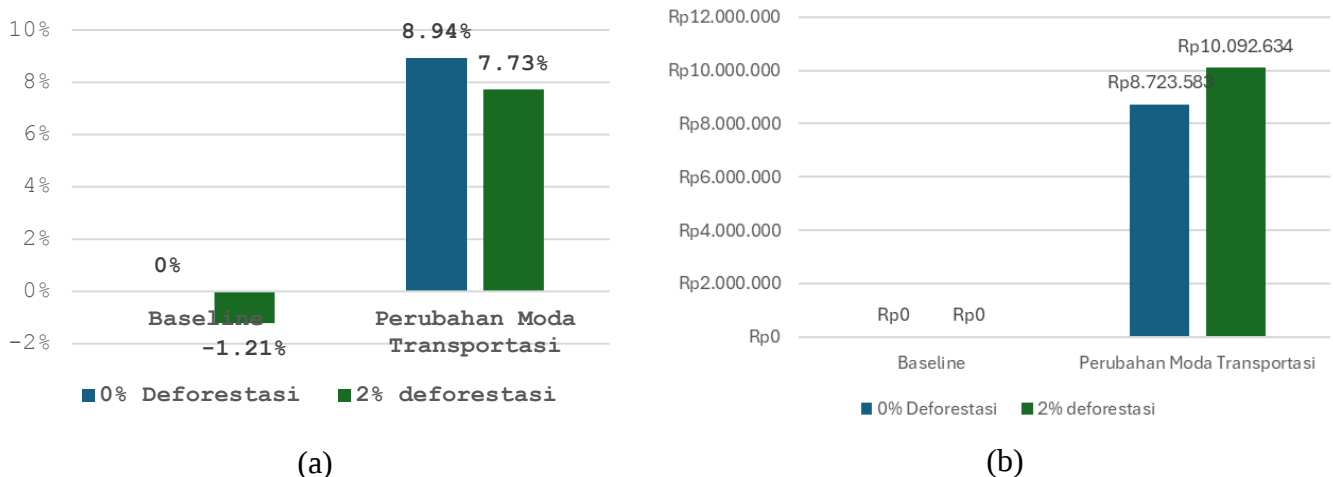
Gambar 1. Diagram Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2024 Dalam Satuan Gigagram

Tingkat emisi di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) tercatat sebesar 1,83 Gg CO₂-eq/km², hampir setara dengan tingkat emisi di Provinsi Bali yang mencapai 1,96 Gg CO₂-eq/km². Kedua wilayah ini merupakan kota budaya sekaligus destinasi wisata unggulan, yang memiliki kesamaan dalam semangat menjaga kelestarian lingkungan dan kebersihan kota. Sebagai contoh di provinsi DIY, desa wisata Sukunan menerapkan prinsip *Ecotourism* melalui sistem pengelolaan sampah partisipatif, yang menurut penelitian Apriliyanti & Randelli (2020) berhasil meningkatkan kualitas lingkungan dan kesadaran warga terhadap higiene perkotaan. Di Provinsi Bali, semangat serupa terlihat melalui berbagai inisiatif komunitas lingkungan seperti *Project Clean Uluwatu*, Niskala Bali, dan Gerakan *Clean Tourism 2025*, yang secara aktif membersihkan pantai dan tempat suci, serta mendorong pengelolaan limbah berbasis budaya Tri Hita Karana (*Clean Tourism Movement*, 2025) dan peran pecalang dalam menjaga lingkungan adat (Sugiantiningsih et al., 2019). Hal tersebut menjadi salah satu faktor penyebab tingkat emisi di keduanya relatif serupa. Namun, jika dibandingkan dengan rata-rata emisi tingkat nasional yang hanya sebesar 0,33 Gg CO₂-eq/km², terlihat bahwa angka emisi DIY tergolong tinggi. Ini menunjukkan bahwa pengembangan destinasi wisata baru di wilayah DIY berpotensi meningkatkan jumlah kunjungan dan penggunaan moda transportasi, yang pada akhirnya akan berdampak pada peningkatan emisi karbon. Perbandingan yang lebih mencolok terlihat saat dibandingkan dengan Provinsi DKI Jakarta, yang memiliki tingkat emisi sebesar 105,20 Gg CO₂-eq/km². Tingginya angka ini mencerminkan peningkatan kebutuhan akan hunian, moda transportasi, dan konsumsi energi, yang secara langsung mendorong emisi dari sektor pemukiman dan transportasi. Studi oleh Hu et al. (2023) menunjukkan bahwa urbanisasi sebesar 1% dapat meningkatkan emisi karbon secara signifikan, terutama di negara berkembang dengan ketergantungan tinggi pada bahan bakar fosil. Jika tidak diimbangi dengan upaya perbaikan lingkungan seperti reforestasi, peningkatan emisi ini dapat berdampak serius terhadap keberlanjutan lingkungan. World Resources Institute (2022) menyatakan bahwa reforestasi dan perlindungan hutan tropis memiliki potensi besar dalam menyerap emisi karbon dan memperkuat ketahanan iklim di kawasan urban.



Gambar 2. Diagram Perbandingan Nilai Emisi Perluas Wilayah Antar Provinsi di Indonesia tahun 2024

Simulasi skenario penurunan emisi, yang didasarkan pada laju deforestasi menunjukkan bahwa kombinasi antara kebijakan sektoral dan pengendalian deforestasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap capaian pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) (Gambar 3)



Gambar 3. Diagram Hasil Simulasi satu Skenario dengan Laju Deforestasi: (a) Diagram penurunan Emisi GRK, dan (b) Biaya per Satuan Ton CO₂ yang dikurangi

Skenario diatas menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan emisi GRK di DIY, baik dalam kondisi tanpa deforestasi (0%) maupun dengan deforestasi 2%. Berdasarkan hasil simulasi, emisi total turun dari 5.830,50 Gg CO₂-eq menjadi 5.309,26 Gg CO₂-eq pada kondisi tanpa deforestasi, dan dari 5.830,5 Gg CO₂-eq menjadi 5.379,96 Gg CO₂-eq pada kondisi dengan deforestasi. Penurunan ini mencerminkan efisiensi intervensi sebesar 8,49% dan 7,73% berturut-turut, dibandingkan skenario baseline. Meskipun penurunannya sedikit lebih rendah ketika deforestasi terjadi, hasil ini tetap menunjukkan bahwa strategi elektrifikasi transportasi memberikan kontribusi positif dalam mengimbangi degradasi lingkungan. Namun, pada kondisi baseline terlihat jika terjadi deforestasi sebesar 2% emisi naik dari 5.830,5 Gg CO₂-eq menjadi 5.901.04 Gg CO₂-eq. Tanda negatif menunjukan bahwa kondisi baseline mengalami peningkatan dari kondisi awalnya (memburuk dari kondisi awal).

Nilai penurunan berdasarkan skenario diatas mendukung temuan Sihotang et al. (2021) yang menunjukkan bahwa elektrifikasi kendaraan mampu mengurangi emisi GRK hingga 15% di lingkungan perkotaan. Pengurangan emisi yang terjadi dalam penelitian ini juga sejalan dengan hasil studi oleh Zhao et al. (2019) yang menyatakan bahwa substitusi kendaraan bermotor dengan moda transportasi publik berbasis listrik dapat mengurangi intensitas karbon secara signifikan, terutama jika dilakukan secara masif dan konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa elektrifikasi transportasi merupakan salah satu bentuk transisi energi yang paling relevan diterapkan di daerah urban padat seperti DIY. Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah biaya yang timbul dari implementasi skenario. Dengan biaya total sebesar Rp4,5 triliun, biaya penurunan emisi per Gg CO₂-eq mencapai Rp8,7 juta untuk kondisi tanpa deforestasi

dan Rp10 juta untuk kondisi dengan deforestasi. Nilai ini tergolong efisien jika dibandingkan dengan studi Nguyen et al. (2020) yang memperkirakan biaya elektrifikasi transportasi publik di Hanoi sebesar USD 500–800/ton CO₂-eq (sekitar Rp7–11 juta/Gg CO₂-eq), menjadikan skenario ini cukup layak secara ekonomi. Parameter kelayakan secara ekonomi dalam konteks ini ditinjau dari rasio antara biaya implementasi terhadap hasil penurunan emisi yang diperoleh. Jika biaya per unit pengurangan emisi berada dalam kisaran atau lebih rendah dari estimasi standar internasional (USD 200/ton CO₂-eq berdasarkan laporan IPCC AR6 (2022)), maka intervensi tersebut dapat dikategorikan sebagai layak. Dengan demikian, nilai biaya Rp8,7–10 juta per Gg CO₂-eq masih berada dalam batas wajar secara global, terutama karena skenario ini juga menawarkan manfaat tambahan seperti pengurangan polusi udara, peningkatan kualitas hidup masyarakat urban, serta kontribusi terhadap target nasional *Net Zero Emission* (NZE).

Selain efisiensi biaya, implementasi skenario ini berpotensi mendorong penguatan layanan transportasi publik dan perubahan pola mobilitas masyarakat. Jika diintegrasikan dengan sistem transit berbasis koridor dan jaringan antar kecamatan, maka elektrifikasi moda transportasi tidak hanya menurunkan emisi, tetapi juga meningkatkan aksesibilitas, efisiensi perjalanan, dan kualitas udara. Sebagai ilustrasi, sistem transportasi publik berbasis listrik dapat dikembangkan melalui integrasi koridor utama dan jaringan pengumpan antar wilayah. Misalnya, koridor timur–barat dapat dirancang melintasi jalur padat seperti Jalan Solo–Malioboro–Godean, sementara koridor utara–selatan menghubungkan kawasan Jalan Kaliurang–Tugu Yogyakarta–Terminal Giwangan. Di sepanjang koridor tersebut, halte terpadu dirancang pada lokasi strategis seperti kawasan pendidikan, pusat aktivitas ekonomi, dan permukiman padat. Setiap halte utama kemudian dihubungkan dengan layanan angkutan pengumpan berbasis kendaraan listrik berkapasitas kecil yang melayani area kecamatan seperti Sewon, Banguntapan, Ngaglik, dan Mlati. Melalui sistem ini, mobilitas masyarakat dari kawasan pinggiran menuju pusat kota dapat dilakukan secara efisien tanpa ketergantungan pada kendaraan pribadi. Skema ini tidak hanya berkontribusi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi, tetapi juga mampu memperpendek waktu tempuh perjalanan, meningkatkan aksesibilitas antar wilayah, dan memperbaiki kualitas udara di kawasan perkotaan. Dengan demikian, integrasi moda transportasi berbasis listrik dengan jaringan transit wilayah mendukung pergeseran pola mobilitas masyarakat menuju moda berkelanjutan, yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mendorong peningkatan konektivitas spasial dan keadilan akses transportasi lintas demografi. Dampak ini mendukung konsep *co-benefit* yang ditekankan dalam kebijakan pembangunan rendah karbon (LCDI, 2019), di mana pengurangan emisi berjalan seiring dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat.

Peran kawasan hutan dalam menyerap emisi juga signifikan. Dengan simulasi deforestasi 2%, terjadi pengurangan kemampuan serapan karbon, yang berkontribusi terhadap kenaikan emisi bersih. Studi oleh Kurnianto et al. (2020) menyatakan bahwa hutan sekunder di Jawa mampu menyerap rata-rata 200-ton CO₂/ha per tahun, sehingga degradasi hutan sekecil apapun berpotensi besar meningkatkan emisi bersih. Artinya, integrasi kebijakan transportasi dengan kebijakan tata guna lahan dan konservasi sangat krusial. Jika konservasi kawasan hijau gagal dilakukan, maka pencapaian target NZE di tingkat daerah akan sulit diraih, sekalipun sektor energi telah melakukan transisi.

Secara keseluruhan, skenario peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik memberikan nilai kompromi terbaik antara efektivitas penurunan emisi dan efisiensi biaya, dibandingkan skenario lainnya yang mungkin lebih ambisius namun mahal secara ekonomi. Hal ini sejalan dengan pendekatan *cost-effective mitigation* yang disarankan dalam LCDI (BAPPENAS, 2019), yaitu mengutamakan intervensi yang memberikan dampak signifikan dengan biaya yang dapat ditanggung oleh anggaran nasional maupun daerah. Pemerintah daerah dapat menjadikan hasil skenario ini sebagai dasar perencanaan investasi hijau dan integrasi kebijakan sektoral untuk pembangunan berkelanjutan.

Temuan ini mengindikasikan pentingnya pendekatan transisi energi yang bersifat multisektoral. Kebijakan konversi kendaraan pribadi ke angkutan umum dan elektrifikasi moda transportasi perlu disertai upaya pelestarian kawasan hijau dan peningkatan aksesibilitas masyarakat terhadap transportasi publik yang andal. Dukungan kelembagaan, insentif fiskal, serta literasi masyarakat menjadi prasyarat penting agar perubahan sistemik ini dapat berjalan secara menyeluruh dan berkelanjutan.

4 KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa skenario peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik, yang mengusung pendekatan elektrifikasi moda transportasi dan peralihan kendaraan pribadi ke transportasi umum, mampu memberikan dampak signifikan terhadap penurunan emisi gas rumah kaca di Provinsi

Daerah Istimewa Yogyakarta. Dengan penurunan emisi sebesar 8,49% pada kondisi tanpa deforestasi dan 7,37% dengan deforestasi, skenario ini terbukti efektif dalam menahan laju peningkatan emisi, bahkan di bawah tekanan degradasi lingkungan.

Efisiensi biaya yang dihasilkan pun tergolong baik, yaitu berkisar antara Rp8,7 juta hingga Rp10 juta per Gg CO₂-eq, sebanding dengan studi internasional. Hal ini menandakan bahwa skenario peralihan 20% kendaraan pribadi ke moda transportasi publik berbasis listrik tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga secara ekonomi. Selain itu, temuan ini menegaskan pentingnya mempertahankan kawasan hutan sebagai penyerap karbon agar manfaat penurunan emisi dari sektor transportasi tidak tergerus oleh degradasi lahan.

Pemerintah daerah DIY perlu mulai mengimplementasikan kebijakan peralihan moda transportasi berbasis listrik secara bertahap, dimulai dari rute-rute prioritas dengan intensitas lalu lintas tinggi. Kebijakan transisi energi di sektor transportasi sebaiknya juga diintegrasikan dengan kebijakan pelestarian lingkungan, khususnya perlindungan kawasan hutan dan ruang terbuka hijau. Diperlukan sinergi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat untuk mendorong investasi dalam infrastruktur transportasi publik rendah emisi, baik dari sisi teknologi, sarana pendukung, maupun edukasi publik. Selain itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan cakupan waktu yang lebih panjang dan memperhitungkan variabel sosial-ekonomi seperti perilaku pengguna, keterjangkauan tarif, dan kesiapan teknologi lokal. Pendekatan ini akan memperkuat dasar pengambilan keputusan dalam kebijakan pembangunan rendah karbon yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif selama proses penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Perhubungan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, serta Badan Pusat Statistik atas ketersediaan data yang menjadi dasar dalam analisis dan simulasi. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada para dosen pembimbing dan rekan sejawat atas masukan yang konstruktif dalam penyusunan dan penyempurnaan artikel ini. Penelitian ini tidak akan terselesaikan tanpa kontribusi dan dukungan dari berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan kebijakan transportasi berkelanjutan dan pembangunan rendah karbon di Provinsi DIY.

REFERENSI

- Apriliyanti, A., & Randelli, F. (2020). Implementation of Community-Based Ecotourism through Waste Management: The Study Case of Sukunan Tourism Village, Yogyakarta, Indonesia. *Gadjah Mada Journal of Tourism Studies*.
- Austin, K.G., Schwantes, A., Gu, Y., and Kasibhatla, P.S. (2015). "What causes deforestation in Indonesia?" *Environmental Research Letters*, 10(2), 024007.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (BAPPENAS). (2019). *Low Carbon Development: A Paradigm Shift Towards a Green Economy in Indonesia*. Jakarta.
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). *Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dalam Angka 2023*. Yogyakarta.
- Bappeda DIY. (2021). *Kajian Strategis Emisi GRK DIY dalam Mendukung RPJMD dan RAN-GRK*. Yogyakarta.
- BAPPENAS (2019). *Low Carbon Development: A Paradigm Shift Towards a Green Economy in Indonesia*. Jakarta: Kementerian PPN/BAPPENAS
- BAPPENAS. (2020). *Kajian Pengembangan Transportasi Rendah Karbon di Indonesia*. Jakarta.
- Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S.C., Griscom, B.W., Kroeger, T., Possingham, H., and Shyamsundar, P. (2019). "Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation." *Nature Climate Change*, 9(6), 463–466.
- Clean Tourism Movement (2025). *Transforming Bali's Beaches for a Sustainable Future*.
- Dewi, S., Khasanah, N., Rahayu, S., Ekadinata, A., and van Noordwijk, M. (2018). "Mitigating greenhouse gas emissions through conservation of peat swamp forests in Indonesia." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, 203–222.
- Edi Rusdiyanto, Sumartono, Munawir, A., et al. (2023). "Sustainable Settlement Area: Threats of Environmental Change Due to Yogyakarta International Airport." *Research Square (Preprint)*, 17 February.
- Firdaus, F. (2019). *Jejak Karbon Sektor Energi D.I. Yogyakarta dan Rekomendasi Jumlah Pohon yang Harus Ditanam untuk Reduksi Emisi Gas CO₂*. Yogyakarta.

- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., et al. (2017). "Natural climate solutions." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650.
- Hu, M., Zhang, Y., & Xu, X. (2023). *Urbanization, Energy Consumption and CO₂ Emissions: A Global Analysis Using the STIRPAT Model*. *Sustainability*, 16(18), 7878. <https://doi.org/10.3390/su16187878>
- Institute for Transportation & Development Policy (ITDP). (2019). Buy the Service (BTS): Pendekatan Baru Layanan Transportasi Umum di Indonesia. Jakarta. Retrieved from <https://itdp-indonesia.org>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy. Geneva.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use). Geneva.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Geneva. (Online)
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Geneva. (Online)
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2023). Sistem Registri Nasional Pengendalian Perubahan Iklim (SRN-PPI). Jakarta.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2022). Petunjuk Teknis Pelaksanaan Layanan Buy The Service (BTS) Tahun Anggaran 2022. Jakarta: Direktorat Jenderal Perhubungan Darat.
- Kurnianto, S., et al. (2020). "Potensi serapan karbon oleh hutan sekunder di Pulau Jawa." *Jurnal Kehutanan Tropis*, 18(1).
- Murdiyarso, D., Dewi, S., Lawrence, D., and Seymour, F. (2011). *Indonesia's Forest Moratorium: A Stepping Stone to Better Forest Governance?* CIFOR.
- Nguyen, T.A., Le, H.Q., Bui, H.M., and Tran, M.T. (2020). "Cost-benefit analysis of electric bus adoption in Hanoi." *Journal of Cleaner Production*, 274, 122987.
- Nur, R.P.R., and Purnomo, H. (2015). "Model simulasi emisi dan penyerapan CO₂ di Kota Bogor." *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20, 47–52.
- Nurwita, E., Santosa, D.A., and Pramono, H. (2022). "Peran penutupan lahan dan tutupan hutan terhadap neraca karbon di Provinsi DIY." *Jurnal Lingkungan Tropis*, 6(2), 112–123.
- Purwanta, W. (2010). "Penghitungan emisi karbon dari lima sektor pembangunan berdasar metode IPCC dengan verifikasi faktor emisi dan data aktivitas lokal." *Jurnal Teknik Lingkungan*, 11, 71–77.
- Rypdal, K., Paciornik, N., Eggleston, S., Goodwin, J., Irving, W., Penman, J., and Woodfield, M. (2006). "Introduction to the 2006 Guidelines." 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Retrieved from <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- Sihotang, M., Tarigan, A.P., and Nababan, R. (2021). "Evaluasi potensi pengurangan emisi melalui elektrifikasi kendaraan." *Jurnal Energi Terbarukan*, 10(1).
- Stickler, C.M., Duchelle, A.E., Nepstad, D.C., and Seymour, F. (2020). *The State of Jurisdictional Sustainability: Synthesis for Practitioners and Policymakers*. Earth Innovation Institute.
- Sugiantiningsih, A. P., Weni, I. M., Hariyanto, T., & Tutuko, P. (2019). Enhancing Environmental Quality through Community Participation based on Traditional Rules: Empowering the New Role of Pecalang in Bali. *Journal of Southwest Jiaotong University*.
- Widayati, A., and Kuncahyo, B. (2020). "Hutan rakyat sebagai penyerap karbon di Kabupaten Gunungkidul, DIY." *Jurnal Kehutanan*, 14(1), 45–54.
- World Resources Institute (WRI). (2022). *Better Forests, Better Cities: Urban Forests as a Climate Solution*. Washington, DC: WRI. Retrieved from <https://publications.wri.org/better-forests-better-cities>
- Zhao, J., Chen, J., Xu, X., and Zhou, H. (2019). "Impacts of replacing private vehicles with electric public transport on urban carbon emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 276–287.