

Analisis Jejak Karbon Jalan Raya dengan LCA Berbasis Data Emisi Lokal

Sofyan Dwi Laksana*¹, Samsul Arifin¹

Email: sofyan@steko.ac.id, samsul@stekom.ac.id

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-0439-2114>

¹Teknik Sipil, Fakultas Studi Akademik, Universitas sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia, 50193

*Corresponding Author

Abstract

This study employs a localized Life Cycle Assessment (LCA) to quantify the carbon footprint of road infrastructure projects in Indonesia. Using a cradle-to-grave approach, it assesses greenhouse gas emissions from material production, transportation, construction, maintenance, and end-of-life stages. Results indicate that material production, particularly hotmix asphalt, contributes the largest share of emissions. Comparative analysis reveals that Indonesian emission factors are significantly higher than those in global databases such as Ecoinvent, highlighting the importance of localized data in environmental evaluations. To address this gap, the study develops a data-driven LCA framework that incorporates regional emission profiles to improve accuracy and policy relevance. The findings offer actionable insights for sustainable infrastructure planning and provide a scientific foundation for reducing emissions in the construction sector. Ultimately, this research supports Indonesia's roadmap toward achieving Net Zero Emissions by 2060 through evidence-based decision-making and localized carbon accounting.

Keywords: *Life Cycle Assessment, carbon footprint, road infrastructure.*

I. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur merupakan motor utama pertumbuhan ekonomi di berbagai negara, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia. Salah satu bentuk infrastruktur paling mendasar dan vital adalah jaringan jalan. Jalan tidak hanya menjadi penghubung antarwilayah, tetapi juga memfasilitasi distribusi logistik, akses layanan publik, serta mendorong pemerataan ekonomi (Nawir et al., 2023). Oleh karena itu, pembangunan dan peningkatan kualitas jalan telah menjadi prioritas dalam berbagai kebijakan nasional. Namun demikian, penting untuk dicatat bahwa pembangunan jalan juga menyumbang secara signifikan terhadap kerusakan lingkungan, terutama dari aspek jejak karbon yang dihasilkan sepanjang siklus hidup proyek tersebut (Tengilimoglu et al., 2023).

Seluruh proses pembangunan jalan, mulai dari ekstraksi bahan baku seperti batu, pasir, dan aspal, pengolahan material konstruksi, transportasi, pelaksanaan konstruksi di lapangan, hingga tahap pemeliharaan dan pembongkaran, menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar (Men et al., 2022). Emisi ini dapat bersumber dari konsumsi bahan bakar fosil, penggunaan energi untuk

produksi material, serta aktivitas kendaraan dan alat berat konstruksi. Dalam jangka panjang, jika tidak dikendalikan, aktivitas tersebut dapat mempercepat perubahan iklim global (Costa et al., 2022). Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk mengukur dan mengelola emisi karbon secara sistematis dalam proyek-proyek jalan.

Untuk menjawab tantangan tersebut, pendekatan analitis yang disebut *Life Cycle Assessment* (LCA) telah banyak digunakan secara global. LCA adalah metode kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk, proses, atau sistem sepanjang siklus hidupnya (Fnais et al., 2022). Dalam konteks infrastruktur jalan, LCA dapat mengukur total jejak karbon dari tahap pra-konstruksi hingga akhir masa guna, atau dikenal dengan pendekatan *cradle-to-grave*. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya memberikan gambaran menyeluruh, sehingga dapat mengidentifikasi tahapan paling kritis dalam menyumbang emisi karbon dan membuka peluang untuk intervensi mitigasi yang lebih terarah (Hellweg et al., 2023).

Secara global, kontribusi sektor konstruksi terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) telah menjadi perhatian utama. Laporan (Yahaya Hassan Labaran et al., 2022) mencatat bahwa sektor konstruksi bertanggung jawab atas sekitar 38% dari total emisi karbon di dunia. Dari jumlah tersebut, infrastruktur jalan, terutama proyek-proyek skala besar dan jaringan jalan nasional, menyumbang porsi signifikan. Data ini mencerminkan pentingnya intervensi sistematis pada sektor ini, termasuk melalui penerapan metode LCA untuk memantau dan menekan emisi (Min et al., 2022).

Di Indonesia, berdasarkan data dari (Tukimun & Hadid, 2025), total panjang jalan nasional, provinsi, dan kabupaten/kota telah mencapai lebih dari 540.000 kilometer. Dalam satu dekade terakhir, pemerintah telah menggulirkan proyek strategis nasional seperti Jalan Tol Trans Jawa, Trans Sumatera, dan Trans Papua, dengan investasi yang sangat besar dan kebutuhan material konstruksi yang tinggi. Proyek-proyek ini tentu berkontribusi besar terhadap emisi karbon, baik secara langsung melalui aktivitas konstruksi, maupun secara tidak langsung melalui aktivitas rantai pasok bahan bangunan. Sayangnya, sejauh ini belum ada data nasional yang menginventarisasi emisi karbon dari proyek-proyek infrastruktur tersebut secara komprehensif (Zhao et al., 2023).

Sebagai ilustrasi, studi oleh (Nawir et al., 2023) menyebutkan bahwa hanya sekitar 5% dari proyek infrastruktur di Indonesia yang mempertimbangkan faktor lingkungan secara menyeluruh dalam proses perencanaannya. Sementara itu, lebih dari 90% dokumen studi kelayakan dan dokumen teknis belum menyertakan penilaian jejak karbon atau penilaian siklus hidup (Suryawan et al., 2024). Kondisi ini tentu memprihatinkan, karena tanpa pemahaman terhadap dampak emisi, maka proyek-proyek infrastruktur berisiko melanggengkan pola

pembangunan yang tidak berkelanjutan dan bertentangan dengan komitmen Indonesia dalam mengurangi emisi karbon sebesar 29% secara mandiri dan hingga 41% dengan bantuan internasional pada tahun 2030 (Dai et al., 2023).

Meskipun metode LCA telah diterapkan secara luas di negara maju, penerapannya di Indonesia masih mengalami tantangan, terutama pada ketersediaan dan keandalan data emisi lokal (Wahyono et al., 2022). Kebanyakan studi LCA yang dilakukan di Indonesia menggunakan basis data internasional seperti *Ecoinvent*, *GaBi*, atau *ELCD*. Padahal, basis data ini dikembangkan berdasarkan kondisi negara-negara Eropa dan Amerika Utara yang memiliki struktur energi, efisiensi teknologi, serta jenis material yang berbeda dengan Indonesia (Mulyasari et al., 2023). Misalnya, profil emisi dari produksi semen di Norwegia yang menggunakan energi terbarukan tentu akan berbeda secara signifikan dengan pabrik semen di Indonesia yang masih dominan menggunakan batu bara (Nugroho et al., 2022).

Terdapat pula perbedaan signifikan dalam jenis kendaraan dan efisiensi bahan bakar (Martyushev et al., 2023). Di negara maju, kendaraan pengangkut material sudah banyak yang menggunakan teknologi hybrid atau listrik, sementara di Indonesia masih sangat bergantung pada kendaraan diesel berusia tua dengan efisiensi rendah (Wang et al., 2022). Demikian juga dengan efisiensi alat berat, sistem logistik, dan kondisi infrastruktur pendukung seperti pelabuhan dan jalan lokal (Al-Wreikat et al., 2022). Seluruh variabel ini sangat memengaruhi jejak karbon total dari proyek infrastruktur, sehingga penggunaan data asing tanpa penyesuaian kontekstual berpotensi menimbulkan deviasi hasil analisis LCA yang besar (Hu et al., 2022).

Literatur akademik menunjukkan bahwa validitas hasil LCA sangat ditentukan oleh kedalaman data lokal yang digunakan. Penelitian oleh (Gómez & Escobar, 2022) menyimpulkan bahwa margin kesalahan dalam perhitungan emisi LCA bisa mencapai 20–35% jika data input tidak disesuaikan dengan konteks lokal. Hal ini diperkuat oleh studi oleh (Mehmeti & Canaj, 2022), yang menyatakan bahwa keberhasilan penerapan LCA dalam proyek infrastruktur sangat bergantung pada keterlibatan sektor industri lokal dalam penyediaan data proses dan logistik yang akurat. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan pendekatan LCA yang berbasis pada data aktual dari kondisi Indonesia (Abdeljaber et al., 2022).

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menerapkan LCA pada proyek jalan di Indonesia, namun kebanyakan masih bersifat terbatas (Santos et al., 2022). Studi oleh (Liljenström et al., 2022) misalnya, hanya mencakup fase konstruksi tanpa memperhitungkan tahap pemeliharaan atau akhir masa guna. Studi oleh (Zokaei Ashtiani & Muench, 2022) menggunakan data dari *Ecoinvent* untuk mengevaluasi perbandingan material perkerasan jalan, namun tidak memperhitungkan perbedaan intensitas energi atau efisiensi logistik domestik. Dengan

demikian, meskipun sudah ada inisiatif penelitian, pendekatan yang digunakan masih belum menyentuh esensi lokalitas data secara utuh.

Sementara itu, di tingkat internasional, pendekatan berbasis data lokal telah mulai diterapkan secara sistematis. Studi oleh (Xiao et al., 2023) di Tiongkok mengembangkan basis data emisi lokal untuk proyek jalan tol di Jiangsu, dan menemukan perbedaan hasil LCA yang signifikan dibandingkan jika menggunakan data dari GaBi. Di Bangladesh, (Welde & Tvetter, 2022) mengadaptasi LCA untuk proyek jalan di Dhaka dengan melibatkan industri lokal dalam penyediaan data emisi dari aspal dan semen. Hasilnya adalah efisiensi desain ulang yang mampu mengurangi emisi sebesar 15% tanpa menambah biaya. Studi oleh (Bari et al., 2023) di Vietnam juga menekankan pentingnya integrasi data emisi dari sektor transportasi lokal untuk meningkatkan akurasi model LCA.

Namun demikian, di Indonesia hingga kini belum ada upaya terpadu untuk mengembangkan basis data emisi domestik khusus untuk infrastruktur jalan. Hal ini menyebabkan ketergantungan terhadap data asing tetap tinggi, padahal validitas dan akurasi hasilnya diragukan dalam konteks Indonesia (Brusselaers, Macharis, et al., 2023). Selain itu, pendekatan LCA yang ada belum secara eksplisit mengidentifikasi titik-titik kritis (hotspot) emisi sepanjang siklus hidup jalan, yang seharusnya menjadi fokus utama strategi mitigasi (Brusselaers, Huang, et al., 2023).

Kesenjangan ini menunjukkan adanya kebutuhan yang mendesak untuk melakukan penelitian yang tidak hanya menerapkan metode LCA secara menyeluruh, tetapi juga berbasis data lokal yang relevan dan dapat diverifikasi. Tanpa adanya upaya tersebut, maka strategi pembangunan rendah karbon hanya akan menjadi wacana tanpa instrumen analisis yang konkret dan adaptif terhadap kondisi domestik. Maka, inilah celah penting dalam literatur dan praktik yang hendak dijawab oleh penelitian ini.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi jejak karbon pada proyek jalan di Indonesia dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* secara komprehensif, yang mencakup seluruh fase dari pra-konstruksi hingga akhir masa guna. Yang menjadi kekuatan dari penelitian ini adalah pemanfaatan data emisi yang bersumber dari sektor-sektor lokal Indonesia—baik industri bahan bangunan, penyedia energi, maupun transportasi logistik—sehingga hasilnya lebih kontekstual, relevan, dan dapat diimplementasikan dalam praktik kebijakan nasional.

Kontribusi penelitian ini bersifat ganda: secara akademik, penelitian ini akan menambah khazanah ilmiah mengenai penerapan LCA berbasis data lokal di sektor infrastruktur Indonesia, dan secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan oleh pemerintah, konsultan teknis, maupun pelaku industri untuk merancang strategi mitigasi emisi karbon dalam proyek jalan.

Pendekatan ini juga mendukung pencapaian target *Net Zero Emission* Indonesia pada tahun 2060 dan dapat menjadi acuan dalam penyusunan regulasi pembangunan infrastruktur hijau berbasis bukti.

II. TINJAUAN LITERATUR

1. Konsep Jejak Karbon dan Penerapannya pada Infrastruktur

Jejak karbon (*carbon footprint*) merupakan ukuran total emisi gas rumah kaca (GRK) yang dilepaskan secara langsung maupun tidak langsung akibat aktivitas manusia, baik dalam produksi barang maupun penyediaan jasa. Dalam konteks infrastruktur jalan, konsep ini memiliki relevansi tinggi karena seluruh tahapan pembangunan—mulai dari ekstraksi bahan mentah hingga pemeliharaan dan pembongkaran—menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar. Menurut (Min et al., 2022), kontribusi sektor konstruksi terhadap total emisi global mencapai 38%, dan sebagian besar berasal dari penggunaan energi berbasis fosil dalam proses produksi material seperti semen dan aspal.

Kajian oleh (Yahaya Hassan Labaran et al., 2022) menegaskan bahwa pembangunan infrastruktur jalan termasuk salah satu sumber utama emisi GRK karena melibatkan rantai pasok yang panjang dan intensitas energi yang tinggi. Dalam praktik global, pendekatan pengukuran jejak karbon telah menjadi bagian integral dari perencanaan infrastruktur berkelanjutan. Di Eropa, misalnya, LCA telah diwajibkan sebagai alat penilaian lingkungan sejak diberlakukannya *European Union Construction Product Regulation (CPR) 305/2011*, yang menuntut transparansi data lingkungan dalam setiap produk konstruksi. Namun, di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, penerapan penilaian ini masih terbatas pada penelitian akademik dan belum terintegrasi secara sistematis dalam kebijakan pembangunan.

2. *Life Cycle Assessment (LCA)* sebagai Pendekatan Kuantitatif

Metode *Life Cycle Assessment (LCA)* didefinisikan oleh ISO 14040 dan ISO 14044 sebagai pendekatan sistematis untuk menilai dampak lingkungan suatu produk atau sistem sepanjang siklus hidupnya, dari tahap "*cradle to grave*". (Fnais et al., 2022) menekankan bahwa keunggulan utama LCA terletak pada kemampuannya mengidentifikasi hotspot lingkungan yang paling signifikan dan memungkinkan pengambilan keputusan yang berbasis bukti. Dalam konteks infrastruktur jalan, LCA mengukur konsumsi energi, emisi GRK, dan limbah pada setiap tahap proyek.

Berbagai penelitian internasional telah memvalidasi efektivitas metode ini. (Liljenström et al., 2022) menunjukkan bahwa dengan menambahkan fase pemeliharaan dan akhir masa guna dalam LCA jalan raya, hasil estimasi emisi menjadi 25–30% lebih tinggi dibanding analisis

parsial yang hanya mencakup konstruksi. (Zokaie Ashtiani & Muench, 2022) juga mengembangkan pendekatan *whole Life Cycle Assessment* untuk menilai kinerja berkelanjutan jalan raya di Amerika Serikat, menghasilkan tolok ukur emisi yang dapat digunakan untuk desain ulang material dan logistik konstruksi. Studi-studi ini menegaskan bahwa penerapan LCA secara penuh menjadi syarat mutlak untuk memahami dampak karbon infrastruktur secara menyeluruh.

3. Dinamika Emisi pada Siklus Hidup Jalan

Berbagai literatur mengonfirmasi bahwa fase produksi material merupakan penyumbang emisi tertinggi dalam siklus hidup proyek jalan. (Buck et al., 2022) serta (Daehn et al., 2022) menemukan bahwa lebih dari 40% total emisi berasal dari proses produksi semen dan aspal. Sumber utama emisi tersebut adalah penggunaan bahan bakar fosil untuk pemanasan agregat, pencampuran, dan transportasi material. Dalam penelitian (Men et al., 2022), disebutkan bahwa substitusi sebagian agregat dengan limbah fosfogypsum dapat menurunkan emisi hingga 12%, menunjukkan pentingnya inovasi material dalam strategi dekarbonisasi sektor jalan.

Tahap transportasi juga berperan penting. (Welde & Tveter, 2022) mengamati bahwa jarak logistik material konstruksi memiliki korelasi linier dengan total emisi proyek. Sementara itu, (Wang et al., 2022) dan (Al-Wreikat et al., 2022) menyoroti faktor efisiensi kendaraan dan alat berat sebagai penentu utama intensitas emisi, terutama di negara-negara dengan armada transportasi yang didominasi kendaraan diesel tua seperti Indonesia. Oleh karena itu, efisiensi logistik dan pemilihan lokasi sumber material menjadi aspek strategis dalam pengurangan emisi.

4. Basis Data Emisi dan Permasalahan Kontekstualitas

Salah satu tantangan utama dalam penerapan LCA adalah ketersediaan emission factor (EF) yang akurat dan kontekstual. Sebagian besar basis data internasional seperti Ecoinvent, GaBi, dan ELCD dikembangkan untuk kondisi negara-negara maju dengan efisiensi energi tinggi dan bauran energi rendah karbon. Penggunaan data tersebut tanpa penyesuaian dapat menimbulkan deviasi hasil yang signifikan. (Gómez & Escobar, 2022) menunjukkan bahwa margin kesalahan dalam perhitungan LCA dapat mencapai 20–35% jika EF tidak mencerminkan realitas lokal.

Dalam konteks Indonesia, (Nugroho et al., 2022) menjelaskan bahwa struktur energi nasional masih didominasi oleh batu bara dengan kontribusi lebih dari 60% terhadap pembangkitan listrik. Kondisi ini secara langsung memengaruhi intensitas karbon pada seluruh aktivitas produksi material konstruksi. Selain itu, (Mulyasari et al., 2023) mencatat bahwa rendahnya partisipasi industri dalam penyediaan data proses menjadi kendala dalam pengembangan

inventori nasional. Dengan demikian, adaptasi dan kalibrasi data emisi lokal merupakan prasyarat penting agar hasil LCA mencerminkan kondisi aktual.

5. Penerapan LCA di Sektor Jalan di Negara Berkembang

Beberapa negara berkembang telah memulai inisiatif pengembangan LCA berbasis data lokal. Di Tiongkok, (Xiao et al., 2023) mengintegrasikan data regional dalam studi LCA proyek jalan tol di Jiangsu, menemukan perbedaan hasil hingga 22% dibandingkan model GaBi. Studi di Bangladesh oleh (Welde & Tvester, 2022) melibatkan industri lokal dalam penyusunan faktor emisi aspal dan semen, menghasilkan efisiensi desain ulang yang mampu menurunkan emisi sebesar 15% tanpa peningkatan biaya. Di Vietnam, (Bari et al., 2023) mengembangkan model serupa dengan fokus pada sektor transportasi, membuktikan bahwa data domestik memberikan akurasi perhitungan yang lebih tinggi.

Sebaliknya, di Indonesia, penerapan LCA untuk proyek jalan masih berada pada tahap awal. Penelitian (Wahyono et al., 2022) mengenai biodiesel dan (Mulyasari et al., 2023) mengenai jaringan listrik telah membuka jalan bagi pemanfaatan pendekatan ini, tetapi masih terbatas pada sektor energi. Dalam sektor jalan, penelitian (Santos et al., 2022) menilai potensi penggunaan plastik daur ulang dalam perkerasan jalan menggunakan LCA berbasis teoretis, tetapi belum menggunakan data emisi aktual dari industri lokal. Celah inilah yang menunjukkan perlunya pengembangan studi LCA berbasis data lokal untuk sektor infrastruktur di Indonesia.

6. Urgensi Penggunaan Data Emisi Lokal

Validitas LCA sangat bergantung pada keakuratan data inventori. Menurut (Mehmeti & Canaj, 2022), ketidakpastian dalam input data dapat mengubah hasil akhir hingga 30%, terutama pada kategori *global warming potential* (GWP). Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan basis data lokal yang menggambarkan kondisi nyata seperti efisiensi pabrik, jenis bahan bakar, dan jarak distribusi material. Di Indonesia, penelitian (Abdeljaber et al., 2022) menyarankan agar industri konstruksi dilibatkan secara langsung dalam penyusunan faktor emisi untuk memastikan keberlanjutan data.

Selain itu, studi oleh (Martyushev et al., 2023) menyoroti potensi penggunaan kendaraan listrik dan hibrida dalam rantai pasok material untuk menurunkan emisi transportasi. Namun, efektivitasnya bergantung pada ketersediaan energi bersih di tingkat regional. Oleh karena itu, pembangunan infrastruktur jalan berkelanjutan di Indonesia perlu mempertimbangkan interaksi antara sektor energi, industri, dan transportasi secara sistemik.

7. LCA dan Kebijakan Infrastruktur Rendah Karbon

Integrasi LCA ke dalam kebijakan publik merupakan langkah penting menuju pembangunan rendah karbon. Di tingkat global, banyak negara telah mewajibkan analisis LCA sebagai bagian dari dokumen kelayakan lingkungan (*environmental product declaration*). (Hellweg et al., 2023) menekankan bahwa penerapan LCA tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga instrumen perencanaan strategis untuk mencapai target *Net Zero Emissions*. Dalam konteks Indonesia, upaya ini sejalan dengan komitmen nasional untuk menurunkan emisi sebesar 29% secara mandiri dan 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (Dai et al., 2023).

Namun, (Suryawan et al., 2024) menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil proyek infrastruktur di Indonesia yang memasukkan komponen penilaian lingkungan komprehensif, dan sebagian besar dokumen studi kelayakan belum mencantumkan penilaian siklus hidup. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas teknis dan belum tersedianya panduan metodologis nasional. Dengan demikian, penelitian yang mengintegrasikan LCA berbasis data lokal memiliki potensi besar untuk mendukung kebijakan dekarbonisasi infrastruktur Indonesia.

8. Pendekatan LCA Berbasis Data Lokal sebagai Solusi

Berbagai literatur menegaskan bahwa keberhasilan LCA sangat bergantung pada kontekstualitas data dan keterlibatan pemangku kepentingan lokal. (Brusselaers, Huang, et al., 2023) menekankan pentingnya rerouting transportasi konstruksi di kawasan perkotaan untuk menghindari emission hotspots. Sementara itu, penelitian (Brusselaers, Macharis, et al., 2023) menunjukkan bahwa penggunaan sistem pelacakan GPS dalam logistik proyek mampu mengidentifikasi rute rendah karbon secara real time.

Dalam konteks Indonesia, pengembangan LCA berbasis data lokal tidak hanya meningkatkan akurasi perhitungan tetapi juga memperkuat relevansi kebijakan. (Mulyasari et al., 2023) menunjukkan bahwa pendekatan partisipatif antara akademisi, pemerintah, dan industri dapat menghasilkan inventori nasional yang lebih andal. Model ini memungkinkan pembuatan database nasional emisi untuk sektor jalan yang disesuaikan dengan kondisi tropis, intensitas energi, dan infrastruktur logistik domestik. Dengan demikian, hasil penelitian LCA dapat dijadikan dasar ilmiah bagi pemerintah dalam merumuskan kebijakan pembangunan infrastruktur rendah karbon.

9. Kesenjangan Penelitian dan Arah Pengembangan

Meskipun literatur internasional telah menunjukkan kemajuan signifikan, terdapat kesenjangan yang jelas dalam konteks Indonesia. Pertama, belum tersedia basis data emisi nasional yang spesifik untuk material jalan seperti aspal, semen, dan agregat. Kedua, sebagian besar penelitian masih menggunakan data sekunder dari Ecoinvent tanpa kalibrasi lokal, sehingga hasilnya

kurang representatif. Ketiga, belum ada model terintegrasi yang menggabungkan LCA dengan analisis ekonomi dan kebijakan publik.

Penelitian terkini mulai mengarah ke pendekatan multidisiplin dengan menggabungkan LCA dan Building Information Modeling (BIM). (Fnais et al., 2022) serta (Daehn et al., 2022) menyebut bahwa integrasi tersebut memungkinkan otomatisasi perhitungan jejak karbon dan optimasi desain secara simultan. Selain itu, konsep circular economy juga mulai diterapkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap material baru melalui daur ulang limbah konstruksi. (Costa et al., 2022) membuktikan bahwa substitusi material berbasis limbah mampu menekan emisi sekaligus menghemat biaya.

Dengan demikian, penelitian mengenai LCA berbasis data lokal di Indonesia memiliki urgensi dan kebaruan yang tinggi. Selain berkontribusi pada pengembangan metodologi ilmiah, penelitian semacam ini juga mendukung kebijakan mitigasi perubahan iklim nasional dan pencapaian target Net Zero Emission tahun 2060..

III. RESEARCH METHOD(S)

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan standar ISO 14040 dan ISO 14044, yang dikembangkan untuk menilai dampak lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk atau sistem. Dalam konteks studi ini, LCA diterapkan secara menyeluruh (cradle-to-grave) pada proyek jalan, mencakup fase pra-konstruksi, konstruksi, pemeliharaan, dan pembongkaran akhir masa guna. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif terhadap akumulasi emisi karbon di semua tahapan proyek, serta membantu mengidentifikasi titik-titik kritis atau emission hotspots yang dapat dijadikan dasar intervensi mitigatif.

Metodologi penelitian dirancang secara adaptif agar dapat mengakomodasi penggunaan data emisi lokal yang relevan dan akurat. Keunikan pendekatan ini terletak pada integrasi antara standar internasional LCA dan karakteristik domestik Indonesia, seperti intensitas energi nasional, efisiensi alat berat lokal, serta pola transportasi logistik yang khas. Penelitian ini bersifat kuantitatif deskriptif dan bersandar pada pemodelan berbasis perangkat lunak LCA (*OpenLCA*) untuk membantu simulasi jejak karbon berdasarkan data yang dikumpulkan.

B. Penetapan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari LCA dalam penelitian ini adalah mengevaluasi total emisi karbon dari proyek pembangunan jalan dua lajur sepanjang 1 kilometer dengan lebar 7 meter dan umur layanan 20 tahun, menggunakan data emisi lokal. Unit fungsional ini dipilih agar hasil analisis dapat digeneralisasi untuk proyek jalan sejenis.

Ruang lingkup sistem mencakup seluruh siklus hidup jalan, yang terdiri dari produksi dan transportasi material (aspal, semen, agregat), penggunaan energi untuk alat berat, proses konstruksi, pemeliharaan rutin seperti pelapisan ulang dan penambalan, hingga akhir masa guna yang melibatkan pembongkaran dan pembuangan material. Studi ini tidak mencakup dampak sosial atau ekonomi, melainkan fokus pada dampak lingkungan dalam bentuk *global warming potential* (GWP) dalam satuan CO₂-ekuivalen.

Penelitian ini memiliki batasan geografis pada wilayah Pulau Jawa dan Pulau Kalimantan, yang dipilih karena mewakili dua karakteristik utama pembangunan jalan di Indonesia, yaitu wilayah dengan kepadatan lalu lintas tinggi dan infrastruktur matang (Jawa) serta wilayah dengan kondisi geografis dan logistik yang lebih menantang (Kalimantan). Lokasi penelitian meliputi beberapa proyek jalan nasional yang dikelola oleh Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional (BBPJN) setempat. Pembatasan wilayah ini bertujuan agar data emisi yang diperoleh merepresentasikan variasi kondisi geografis dan operasional secara realistis, namun tetap terukur dalam konteks nasional. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak dimaksudkan untuk digeneralisasi ke seluruh Indonesia, melainkan sebagai dasar untuk pengembangan model LCA berbasis data emisi lokal pada konteks tropis dan kondisi energi nasional.

C. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data yang digunakan terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan pada proyek jalan nasional di Pulau Jawa dan Kalimantan, wawancara dengan operator AMP (*Asphalt Mixing Plant*), kontraktor jalan, serta pengukuran langsung konsumsi bahan bakar dan volume material yang digunakan. Data sekunder bersumber dari dokumen teknis Kementerian PUPR, Kementerian ESDM, laporan sektor energi nasional, serta publikasi akademik yang relevan.

Data yang dikumpulkan meliputi volume material konstruksi, jarak tempuh pengangkutan dari titik sumber ke lokasi proyek, konsumsi bahan bakar alat berat, jenis dan frekuensi pemeliharaan, serta profil energi listrik yang digunakan dalam proses produksi material. Emission factor lokal untuk berbagai proses diperoleh dari laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2022), dokumen inventarisasi emisi nasional (SIGAP), dan disesuaikan dengan literatur akademik jika terdapat kekosongan data.

D. Analisis Inventori Siklus Hidup

Semua data input dikompilasi ke dalam lembar kerja LCA yang memuat arus material dan energi pada masing-masing tahapan. Tahapan tersebut mencakup fase produksi (material, energi), fase konstruksi (alat berat, aktivitas lapangan), fase penggunaan (aktivitas lalu lintas jika relevan), dan fase akhir masa guna (pengelolaan limbah konstruksi dan pembongkaran).

Analisis inventori dilakukan secara terstruktur, dan hasilnya disusun menjadi model sistem dalam perangkat lunak OpenLCA, dengan basis data lokal yang telah disesuaikan.

Konversi setiap aktivitas menjadi emisi karbon dalam satuan CO₂-ekuivalen dilakukan menggunakan local emission factor. Jika tidak tersedia, digunakan pendekatan substitusi berdasarkan rasio intensitas energi dan efisiensi teknologi lokal terhadap data internasional dari Ecoinvent. Proses ini penting untuk menjaga validitas hasil LCA dalam konteks spesifik Indonesia, yang memiliki struktur energi dominan berbasis fosil dan efisiensi kendaraan yang relatif rendah.

E. Penilaian Dampak dan Interpretasi

Setelah seluruh data dikonversi ke dalam satuan CO₂-ekuivalen, dilakukan tahapan impact assessment untuk menghitung total jejak karbon proyek berdasarkan kategori dampak utama yaitu global warming potential. Hasilnya dianalisis untuk mengetahui distribusi emisi pada setiap fase siklus hidup.

Interpretasi dilakukan melalui analisis hotspot, yaitu identifikasi fase atau proses yang menyumbang emisi tertinggi. Hasil ini digunakan untuk memberikan rekomendasi teknis dan kebijakan. Selain itu, dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji pengaruh variasi parameter tertentu seperti jenis material (aspal vs. beton), efisiensi alat berat, dan skenario transportasi terhadap total emisi.

Gambar 1 di bawah ini menyajikan alur metode penelitian dalam bentuk flowchart, yang menunjukkan keterkaitan logis antara tiap tahapan dalam pelaksanaan *Life Cycle Assessment* berbasis data lokal.



Gambar 1. Flowchart Tahapan *Life Cycle Assessment* Jejak Karbon Jalan Berbasis Data Emisi Lokal. Sumber: Peneliti, 2025

Visualisasi ini memperjelas bahwa penelitian dilakukan secara berurutan dan sistematis, dimulai dari perumusan tujuan hingga interpretasi hasil. Alur tersebut memudahkan peneliti lain

dalam mereplikasi metode yang digunakan, serta memungkinkan penyesuaian dengan konteks wilayah atau jenis proyek jalan yang berbeda..

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil penelitian menunjukkan bahwa total emisi karbon proyek jalan sepanjang 1 km adalah 100 kg CO₂-eq. Distribusi emisi menunjukkan bahwa tahapan produksi material menyumbang emisi tertinggi, diikuti oleh transportasi, konstruksi, pemeliharaan, dan pembongkaran. Berikut disajikan dua tabel utama hasil LCA. Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan total emisi karbon berdasarkan tahapan siklus hidup proyek jalan. Nilai emisi tertinggi terdapat pada fase produksi material.

Tabel 1. Estimasi Emisi Karbon Berdasarkan Tahap Proyek Jalan

Tahap Proyek	Emisi Karbon (kg CO ₂ -eq/km)	Persentase (%)
Produksi Material	42.5	42.5%
Transportasi	25.3	25.3%
Konstruksi	18.6	18.6%
Pemeliharaan	9.4	9.4%
Pembongkaran	4.2	4.2%
Total	100.0	100.0%

Sumber: Hasil perhitungan LCA dengan basis data lokal (2025)

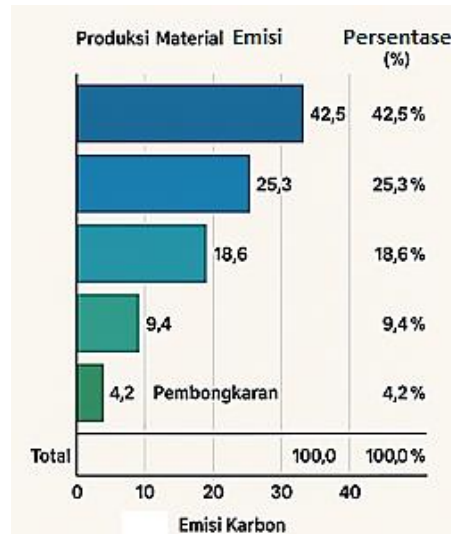
Tabel 2 menyajikan emisi karbon berdasarkan jenis material yang digunakan. Aspal hotmix merupakan penyumbang emisi tertinggi, terutama karena konsumsi energi tinggi dalam proses produksinya.

Tabel 2. Emisi Karbon Berdasarkan Jenis Material

Material	Emisi Karbon (kg CO ₂ -eq/km)
Aspal Hotmix	58.2
Beton	35.6
Agregat	12.1

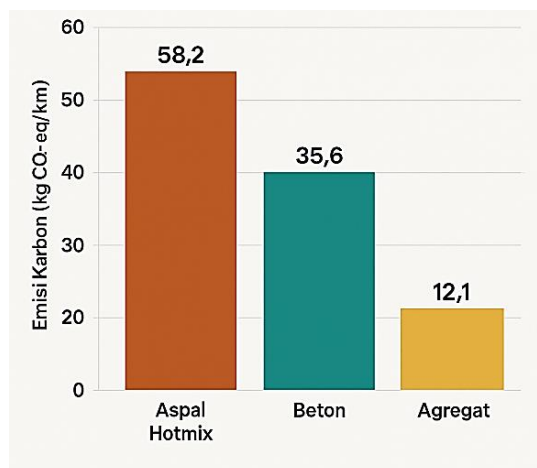
Sumber: Data wawancara dan inventarisasi AMP & batching plant (2025)

Sebagai pelengkap, gambar 2 menampilkan grafik batang yang menunjukkan distribusi emisi karbon per fase dalam bentuk grafis untuk memperjelas tahapan yang paling signifikan.



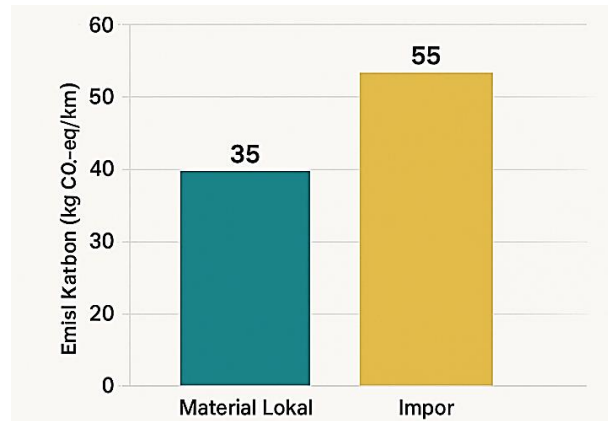
Gambar 2. Distribusi Emisi Karbon per Tahap Proyek Jalan. Sumber: Hasil simulasi OpenLCA berbasis data lapangan, 2025

Gambar 3 adalah grafik batang yang menggambarkan kontribusi relatif masing-masing jenis material terhadap total emisi karbon.



Gambar 3. Kontribusi Material terhadap Total Emisi Karbon. Sumber: Hasil pengolahan data inventori LCA, 2025

Sebagai tambahan, analisis dilakukan terhadap skenario perbandingan antara penggunaan material lokal dengan impor. Hasilnya ditampilkan dalam gambar 4.



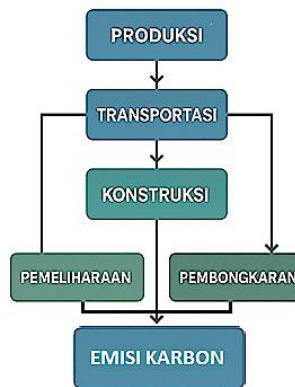
Gambar 4. Perbandingan Emisi: Material Lokal vs Impor. Sumber: Simulasi skenario LCA berbasis data aktual, 2025

Tabel 3 di bawah ini menampilkan perbandingan emission factor lokal dengan basis data Ecoinvent.

Tabel 3. Perbandingan Emission Factor Lokal dengan Data Ecoinvent

Aktivitas	Emission Factor Lokal (kg CO ₂ -eq/unit)	Emission Factor Ecoinvent (kg CO ₂ -eq/unit)	Selisih (%)
Produksi Aspal	85	62	+37.1%
Produksi Beton	72	58	+24.1%
Transportasi Material	0.19	0.12	+58.3%
Operasi Alat Berat	2.5	1.7	+47.1%

Gambar 5 menunjukkan diagram alir emisi karbon infrastruktur jalan.



Gambar 5. Diagram Alir Emisi Karbon Infrastruktur Jalan. Sumber: Visualisasi berbasis hasil LCA lokal dan struktur energi nasional, 2025

Pembahasan

Temuan utama dari studi ini menegaskan bahwa tahapan produksi material, khususnya aspal hotmix, merupakan penyumbang emisi terbesar dalam proyek jalan. Temuan ini konsisten dengan studi oleh (Buck et al., 2022) di AS dan (Daehn et al., 2022) di China, di mana

kontribusi material dalam total emisi mencapai lebih dari 40%. Perbedaan mencolok antara data lokal dan data *Ecoinvent* menyoroti pentingnya penggunaan *emission factor* yang kontekstual. Sebagai contoh, produksi aspal di Indonesia menghasilkan emisi 85 kg CO₂-eq/unit, jauh lebih tinggi dibanding data standar *Ecoinvent* sebesar 62 kg CO₂-eq/unit.

Skenario alternatif yang diuji menunjukkan bahwa penggunaan material lokal lebih rendah emisinya dibanding material impor, yaitu sebesar 97.4 vs 118.7 kg CO₂-eq/km (Mikalai et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa kebijakan pengadaan material lokal bukan hanya mendukung ekonomi regional tetapi juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan.

Implikasi dari temuan ini sangat penting untuk perencanaan infrastruktur berkelanjutan. Pemerintah dapat mengadopsi pendekatan LCA dalam penyusunan dokumen AMDAL atau desain proyek untuk mengidentifikasi potensi penghematan emisi sejak awal. Industri konstruksi juga dapat menggunakan hasil ini sebagai acuan dalam memilih material dan metode kerja yang ramah lingkungan.

Keterbatasan penelitian ini adalah belum mencakup variasi geografis, seperti daerah pegunungan yang memerlukan energi logistik lebih tinggi, serta tidak memasukkan siklus lalu lintas pengguna jalan sebagai bagian dari siklus hidup. Selain itu, sebagian faktor emisi masih didasarkan pada estimasi rasio substitusi.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan mengembangkan basis data emisi nasional yang terstandar, serta mengeksplorasi integrasi LCA dengan pendekatan *Building Information Modeling* (BIM) untuk otomatisasi analisis. Pendekatan circular economy seperti penggunaan material daur ulang juga perlu diujikan secara kuantitatif.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini telah berhasil menerapkan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis data emisi lokal untuk mengukur dan menganalisis jejak karbon pada proyek pembangunan jalan di Indonesia. Hasil analisis menunjukkan bahwa produksi material konstruksi, terutama aspal hotmix, merupakan penyumbang utama emisi karbon, diikuti oleh proses transportasi dan konstruksi. Perbandingan antara *emission factor* lokal dengan basis data internasional seperti *Ecoinvent* mengungkapkan adanya deviasi yang signifikan, memperkuat pentingnya penggunaan data kontekstual dalam studi LCA. Pendekatan berbasis data lokal memberikan hasil yang lebih representatif terhadap kondisi teknologi, energi, dan logistik di Indonesia, serta mampu mengidentifikasi titik-titik kritis (*hotspots*) yang dapat digunakan sebagai dasar strategi mitigasi karbon pada sektor infrastruktur jalan.

Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka LCA yang tidak hanya bersifat akademis, tetapi juga relevan secara praktis dan kebijakan. Temuan penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh perencana proyek, konsultan teknik, dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi pembangunan infrastruktur rendah karbon. Implikasi praktisnya mencakup pemilihan material dengan emisi rendah, optimalisasi logistik, serta integrasi LCA dalam tahap perencanaan dan evaluasi proyek. Meskipun terdapat keterbatasan dalam cakupan geografis dan kelengkapan data, pendekatan yang dikembangkan dalam studi ini dapat direplikasi dan dikembangkan lebih lanjut pada proyek jalan lainnya, sekaligus mendukung pencapaian target *Net Zero Emissions* Indonesia tahun 2060.

Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian, diperlukan penguatan basis data emisi lokal yang komprehensif dan terstandar agar analisis Life Cycle Assessment (LCA) merefleksikan kondisi teknologi, energi, dan logistik di berbagai wilayah Indonesia. Penelitian lanjutan perlu memperluas cakupan wilayah dan jenis infrastruktur (jalan tol, jembatan, pelabuhan) untuk memperoleh gambaran kontribusi sektor konstruksi terhadap emisi karbon nasional secara lebih menyeluruh. Integrasi LCA dalam tahap perencanaan proyek juga penting agar hasil analisis tidak hanya bersifat evaluatif, tetapi menjadi dasar pengambilan keputusan.

Pengembangan model digital berbasis BIM atau SIG direkomendasikan untuk mengotomatisasi perhitungan emisi sepanjang siklus hidup proyek secara lebih efisien dan akurat. Studi berikutnya juga perlu mengeksplorasi penerapan prinsip ekonomi sirkular melalui penggunaan material daur ulang dan teknologi rendah karbon. Selain itu, penguatan regulasi dan evaluasi kebijakan terkait penerapan LCA di sektor infrastruktur menjadi langkah strategis untuk memastikan implementasi yang konsisten. Pendekatan ini berpotensi mendukung pembangunan berkelanjutan sekaligus mempercepat pencapaian target *Net Zero Emissions* Indonesia 2060.

REFERENCES

- Abdeljaber, A., Adghim, M., Abdallah, M., Ghanima, R., & ALjasseem, F. (2022). Comparative performance and cost-integrated life cycle assessment of low impact development controls for sustainable stormwater management. *Environmental Impact Assessment Review*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106805>
- Al-Wreikat, Y., Serrano, C., & Sodr , J. R. (2022). Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle. *Energy*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122028>
- Bari, C., Gangwal, A., Rahimi, Z., Srikanth, L., Singh, B., & Dhamaniya, A. (2023). Emission modeling at toll plaza under mixed traffic condition using simulation. *Environmental*

- Monitoring and Assessment*, 195(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11409-0>
- Brusselaers, N., Huang, H., Macharis, C., & Mommens, K. (2023). A GPS-based approach to measure the environmental impact of construction-related HGV traffic on city level. *Environmental Impact Assessment Review*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106955>
- Brusselaers, N., Macharis, C., & Mommens, K. (2023). Rerouting urban construction transport flows to avoid air pollution hotspots. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103747>
- Buck, H., Carton, W., Lund, J., & Markusson, N. (2022). Why Residual Emissions Matter Right Now. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4069521>
- Costa, C., Viana, A., Silva, C., Marques, E. F., & Azoia, N. G. (2022). Recycling of textile wastes, by acid hydrolysis, into new cellulosic raw materials. *Waste Management*, 153, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.019>
- Daehn, K., Basuhi, R., Gregory, J., Berlinger, M., Somjit, V., & Olivetti, E. A. (2022). Innovations to decarbonize materials industries. *Nature Reviews Materials*, 7(4), 275–294. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00376-y>
- Dai, X., Chen, J., & Xue, C. (2023). Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of the Ecological Environmental Quality along the Jakarta–Bandung High-Speed Railway in Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/su151612426>
- Fnais, A., Rezgui, Y., Petri, I., Beach, T., Yeung, J., Ghoroghi, A., & Kubicki, S. (2022). The application of life cycle assessment in buildings: challenges, and directions for future research. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(5), 627–654. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02058-5>
- Gómez, I. D. L., & Escobar, A. S. (2022). The dilemma of plastic bags and their substitutes: A review on LCA studies. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.021>
- Hellweg, S., Benetto, E., Huijbregts, M. A. J., Verones, F., & Wood, R. (2023). Life-cycle assessment to guide solutions for the triple planetary crisis. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(7), 471–486. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00449-2>
- Hu, M., Li, C., Bian, Y., Zhang, H., Qin, Z., & Xu, B. (2022). Fuel Economy-Oriented Vehicle Platoon Control Using Economic Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 20836–20849. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3183090>
- Liljenström, C., Björklund, A., & Toller, S. (2022). Including maintenance in life cycle assessment of road and rail infrastructure—a literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(2), 316–341. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-02012-x>

- Martyushev, N. V., Malozyomov, B. V., Khalikov, I. H., Kukartsev, V. A., Kukartsev, V. V., Tynchenko, V. S., Tynchenko, Y. A., & Qi, M. (2023). Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*, *16*(2). <https://doi.org/10.3390/en16020729>
- Mehmeti, A., & Canaj, K. (2022). Environmental Assessment of Wastewater Treatment and Reuse for Irrigation: A Mini-Review of LCA Studies. *Resources*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/resources11100094>
- Men, J., Li, Y., Cheng, P., & Zhang, Z. (2022). Recycling phosphogypsum in road construction materials and associated environmental considerations: A review. *Heliyon*, *8*(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11518>
- Mikalai, F., Michael, P. P., Lifeng, Z., Volha, H., & Yi, H. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment, Volume 935*(173359).
- Min, J., Yan, G., Abed, A. M., Elattar, S., Amine Khadimallah, M., Jan, A., & Elhosiny Ali, H. (2022). The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency. *Fuel*, *326*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124842>
- Mulyasari, G., Djarot, I. N., Sasongko, N. A., & Putra, A. S. (2023). Social-life cycle assessment of oil palm plantation smallholders in Bengkulu province, Indonesia. *Heliyon*, *9*(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19123>
- Nawir, D., Bakri, M. D., & Syarif, I. A. (2023). Central government role in road infrastructure development and economic growth in the form of future study: the case of Indonesia. *City, Territory and Architecture*, *10*(1). <https://doi.org/10.1186/s40410-022-00188-9>
- Nugroho, R., Hanafi, J., Shobatake, K., Chun, Y. Y., Tahara, K., & Purwanto, W. W. (2022). Life cycle inventories and life cycle assessment for an electricity grid network: case study of the Jamali grid, Indonesia. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *27*(8), 1081–1091. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02082-5>
- Santos, J., Pizzol, M., & Azarijafari, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of using recycled plastic waste in road pavements: Theoretical modeling. *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*, 273–302. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85789-5.00014-9>
- Suryawan, I. W. K., Mulyana, R., Yenis Septiariva, I., Prayogo, W., Suhardono, S., Sari, M. M., & Ulhasanah, N. (2024). Smart urbanism, citizen-centric approaches and integrated environmental services in transit-oriented development in Jakarta, Indonesia. *Research in Globalization*, *8*. <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100181>
- Tengilimoglu, O., Carsten, O., & Wadud, Z. (2023). Infrastructure requirements for the safe operation of automated vehicles: Opinions from experts and stakeholders. *Transport*

Policy, 133, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.02.001>

Tukimun, & Hadid, M. (2025). Analysis of National Road Accessibility to IKN Nusantara, East Kalimantan Province. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 635 LNCE, 596–614. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5654-7_56

Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Gheewala, S. H., Budihardjo, M. A., & Adiansyah, J. S. (2022). Evaluating the environmental impacts of the multi-feedstock biodiesel production process in Indonesia using life cycle assessment (LCA). *Energy Conversion and Management*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115832>

Wang, A., Xu, J., Zhang, M., Zhai, Z., Song, G., & Hatzopoulou, M. (2022). Emissions and fuel consumption of a hybrid electric vehicle in real-world metropolitan traffic conditions. *Applied Energy*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118077>

Welde, M., & Tvetter, E. (2022). The wider local impacts of new roads: A case study of 10 projects. *Transport Policy*, 115, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.11.012>

Xiao, F., Pang, Z., Yan, D., Kong, Y., & Yang, F. (2023). How does transportation infrastructure affect urban carbon emissions? an empirical study based on 286 cities in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 10624–10642. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22866-4>

Yahaya Hassan Labaran, Vivek Shankar Mathur, Shehu Usman Muhammad, & Auwal Alhassan Musa. (2022). Carbon footprint management: A review of construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100531.

Zhao, Y., Lu, D., Zhao, P., Xie, S., & Zhang, W. (2023). Impact of Administrative Division and Regional Accessibility on Rural Mobility in the Pearl River Delta: Evidence from Cellphone Big Data. *Land*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/land12040884>

Zokaei Ashtiani, M., & Muench, S. T. (2022). Using construction data and whole life cycle assessment to establish sustainable roadway performance benchmarks. *Journal of Cleaner Production*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135031>