



Evaluasi Jejak Karbon Perkerasan Lentur dan Kaku Berbasis *Life Cycle Assessment* Fase *Cradle-to-site* di Desa Wioi

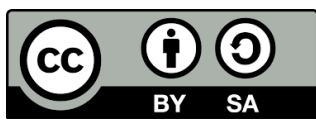
Jecky Umboh, Beldie Aryona Tombeg*, Dian Puspita Sari

Politeknik Negeri Manado, Indonesia

Email: beldie.tombeg@polimdo.ac.id*

Keywords:

carbon footprint, rigid pavement, flexible pavement life cycle assessment



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Publikasiku Publisher

Kata Kunci:

jejak karbon, perkerasan kaku, perkerasan lentur, penilaian daur hidup

Abstract

Economic growth and human population have led to rapid road infrastructure development, which directly increases greenhouse gas emissions. This study aims to evaluate the total carbon footprint of flexible and rigid pavements using the life cycle assessment (LCA) method with cradle-to-site system constraints. The case study was conducted on the Wawali Road Improvement Project in Wioi Village, from the STA 0+400 to STA 0+500 segments. This quantitative research uses a case study approach with secondary data in the form of RAB and shop drawings to calculate material volumes and heavy equipment operational duration. Emissions are calculated based on emission factors from the Inventory of Carbon & Energy (ICE) database and IPCC/DESNZ guidelines. The results show that the total carbon footprint emissions reached 11,522.12 kgCO₂e. Flexible pavements contribute greater emissions (7,639.01 kgCO₂e) than rigid pavements (3,883.11 kgCO₂e). Based on the life cycle stage, material procurement in the production phase is the largest contributor to emissions (52%), followed by the transportation phase (45%) and on-site construction (3%). These findings indicate that rigid pavements are cumulatively more environmentally friendly. Recommended carbon reduction strategies include optimizing the use of environmentally friendly materials such as Warm Mix Asphalt (WMA) and improving the efficiency of the logistics supply chain from the quarry to the project site.

Abstrak

Pertumbuhan ekonomi dan populasi manusia telah menyebabkan perkembangan infrastruktur jalan yang pesat, yang secara langsung meningkatkan emisi gas rumah kaca. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi total jejak karbon perkerasan lentur dan kaku menggunakan metode penilaian siklus hidup (LCA) dengan kendala sistem dari hulu ke hilir (*cradle-to-site*). Studi kasus dilakukan pada Proyek Perbaikan Jalan Wawali di Desa Wioi, dari segmen STA 0+400 hingga STA 0+500. Penelitian kuantitatif ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan data sekunder berupa RAB dan gambar kerja untuk menghitung volume material dan durasi operasional alat berat. Emisi dihitung berdasarkan faktor emisi dari basis data Inventory of Carbon & Energy (ICE) dan pedoman IPCC/DESNZ. Hasil menunjukkan bahwa total emisi jejak karbon mencapai 11.522,12 kgCO₂e. Perkerasan lentur memberikan kontribusi emisi yang lebih besar (7.639,01 kgCO₂e) dibandingkan perkerasan kaku (3.883,11 kgCO₂e). Berdasarkan tahapan siklus hidup, pengadaan material pada fase produksi merupakan penyumbang emisi

terbesar (52%), diikuti oleh fase transportasi (45%) dan konstruksi di lokasi (3%). Temuan ini menunjukkan bahwa perkerasan kaku secara kumulatif lebih ramah lingkungan. Strategi pengurangan karbon yang direkomendasikan meliputi optimalisasi penggunaan material ramah lingkungan seperti Warm Mix Asphalt (WMA) dan peningkatan efisiensi rantai pasokan logistik dari tambang ke lokasi proyek.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi dan peningkatan populasi telah mempercepat pembangunan infrastruktur di seluruh dunia, khususnya pada sektor transportasi (Mahendra & Firmansyah, 2025; Putri et al., 2025; Sjafruddin, 2013; Tampubolon et al., 2025). Infrastruktur jalan memiliki peran penting dalam mendukung aktivitas ekonomi, meningkatkan aksesibilitas masyarakat, serta memperkuat konektivitas antarwilayah (Apriliyaningsih et al., 2025; Jannah & Kurniati, 2025; Melati et al., 2025; Sibali et al., 2025). Namun, perkembangan jaringan jalan yang semakin pesat juga memberikan tekanan terhadap lingkungan, terutama melalui peningkatan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas konstruksi. Sektor konstruksi dikenal sebagai salah satu penyumbang utama emisi karbon global akibat tingginya konsumsi energi, aktivitas ekstraksi bahan baku, proses transportasi material, serta penggunaan alat berat. Oleh karena itu, pembangunan jalan sebagai bagian dari pengembangan infrastruktur memerlukan pendekatan berkelanjutan yang mampu menyeimbangkan antara pertumbuhan ekonomi dan tanggung jawab terhadap lingkungan.

Meningkatnya perhatian terhadap perubahan iklim telah mendorong pemerintah dan peneliti untuk mengembangkan berbagai strategi dalam mengurangi emisi karbon pada proyek infrastruktur (Abisono, 2024; Efendi, 2024; Pratama, 2026; Ramadhani & Nasution, 2026; Wibowo, 2024). Pengukuran jejak karbon (*carbon footprint assessment*) menjadi salah satu pendekatan penting untuk menghitung jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan sepanjang siklus hidup suatu produk maupun aktivitas (Adi et al., 2024; Indarto et al., 2024; Wahyudi, 2017; Werastuti, 2026). Menurut International Energy Agency (IEA), pembangunan infrastruktur dan aktivitas industri masih menjadi salah satu kontributor utama terhadap emisi karbon terkait energi global sehingga membutuhkan strategi mitigasi yang sistematis. Dalam konteks pembangunan jalan, emisi tidak hanya berasal dari aktivitas konstruksi di lokasi proyek, tetapi juga berasal dari proses hulu, seperti pengambilan bahan baku, produksi material, hingga transportasi menuju lokasi pembangunan (Afra et al., 2026; Ervianto, 2024; Mulyana & Wirahadikusumah, 2017; Pandarangga et al., 2015). Oleh sebab itu, evaluasi emisi karbon dengan pendekatan siklus hidup secara menyeluruh menjadi penting untuk mendukung perencanaan infrastruktur yang berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menilai dampak lingkungan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA), yaitu metode yang memungkinkan peneliti mengevaluasi emisi berdasarkan berbagai tahapan dalam siklus hidup suatu produk atau aktivitas konstruksi. Berdasarkan ISO 14040, LCA merupakan metode sistematis yang mencakup penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventarisasi siklus hidup, penilaian dampak, serta interpretasi untuk mengidentifikasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk. Dalam penelitian infrastruktur jalan, pendekatan LCA memungkinkan analisis kontribusi emisi yang berasal dari produksi material, proses transportasi, dan aktivitas konstruksi. Batasan sistem *cradle-to-site*

menjadi relevan karena mencakup tahapan mulai dari ekstraksi bahan material hingga proses penyelesaian konstruksi di lokasi proyek.

Struktur perkerasan jalan secara umum terdiri atas dua jenis utama, yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Perkerasan lentur umumnya menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, sedangkan perkerasan kaku menggunakan beton dengan semen sebagai komponen utama. Perbedaan karakteristik material, proses produksi, kebutuhan energi, serta metode konstruksi pada kedua jenis perkerasan tersebut menyebabkan adanya variasi terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan. Penelitian Thives dan Ghisi (2017) menunjukkan bahwa produksi aspal membutuhkan konsumsi energi yang tinggi akibat proses pemanasan agregat dan pengolahan bahan pengikat, sementara penelitian lainnya menegaskan bahwa produksi semen juga memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon yang terkandung (*embodied carbon emission*). Oleh karena itu, evaluasi komparatif antara sistem perkerasan lentur dan kaku diperlukan untuk mengetahui kinerja lingkungan dari masing-masing jenis perkerasan.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan LCA dalam infrastruktur jalan dan evaluasi emisi karbon. Gouveia et al. (2022) melakukan kajian mengenai penerapan LCA pada infrastruktur perkerasan jalan dan menekankan pentingnya metode tersebut dalam mengidentifikasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup perkerasan. Zheng et al. (2023) menerapkan pendekatan LCA untuk mengevaluasi emisi karbon pada konstruksi jalan dan menunjukkan bahwa produksi material serta aktivitas transportasi memiliki pengaruh signifikan terhadap total emisi yang dihasilkan. Selanjutnya, Singh et al. (2023) mengkaji jejak karbon material konstruksi jalan raya dan menunjukkan bahwa pemilihan material menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja karbon suatu proyek. Di Indonesia, Fistcar (2020) menerapkan LCA untuk membandingkan pemilihan perkerasan kaku dan lentur pada pembangunan jalan tol, sedangkan Yuliyanto et al. (2025) mengevaluasi emisi gas rumah kaca pada *Warm Mix Asphalt* menggunakan pendekatan LCA. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa aspek lingkungan semakin penting untuk dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan pembangunan infrastruktur.

Meskipun jumlah penelitian mengenai emisi karbon pada konstruksi jalan terus meningkat, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada proyek infrastruktur berskala besar, seperti jalan tol, jalan arteri, dan jaringan transportasi utama. Selain itu, banyak penelitian komparatif antara perkerasan lentur dan kaku masih lebih menekankan aspek teknis, daya tahan, serta biaya konstruksi dibandingkan dengan dampak lingkungan. Penelitian mengenai jejak karbon pada proyek jalan berskala lokal atau jalan desa masih relatif terbatas. Lebih lanjut, kajian yang secara langsung membandingkan emisi perkerasan lentur dan kaku dalam satu lokasi proyek yang sama menggunakan batas sistem *cradle-to-site* masih belum banyak dilakukan sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk memahami pengaruh karakteristik material dan proses konstruksi terhadap total emisi karbon.

Penelitian ini membahas permasalahan spesifik terkait emisi karbon yang dihasilkan dari pembangunan sistem perkerasan lentur dan kaku pada Proyek Peningkatan Jalan Wawali di Desa Wioi, Kabupaten Minahasa Tenggara. Proyek tersebut menjadi objek penelitian yang relevan karena menggabungkan penggunaan perkerasan lentur pada badan jalan utama dan

perkerasan kaku berupa beton pada bagian bahu jalan dalam satu area konstruksi yang sama. Penelitian ini mengevaluasi emisi yang berasal dari proses produksi material, transportasi, serta aktivitas konstruksi pada segmen STA 0+400 hingga STA 0+500. Dengan membandingkan kedua jenis perkerasan dalam kondisi proyek yang serupa, penelitian ini memberikan gambaran yang lebih objektif mengenai perbedaan kinerja lingkungan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku.

Urgensi penelitian ini terletak pada meningkatnya kebutuhan terhadap pembangunan infrastruktur berkelanjutan, khususnya pada tingkat pemerintah daerah dan pembangunan wilayah pedesaan. Pengambilan keputusan dalam pembangunan jalan selama ini sering kali lebih mempertimbangkan aspek ekonomi dan teknis, sementara dampak lingkungan belum menjadi perhatian utama. Pemahaman mengenai sumber emisi karbon dalam proyek konstruksi jalan dapat membantu insinyur, perencana pembangunan, dan pemangku kepentingan dalam menentukan alternatif perkerasan yang mampu mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, identifikasi sumber emisi dominan juga penting untuk merancang strategi mitigasi, seperti optimalisasi pemilihan material, peningkatan efisiensi transportasi, serta penerapan teknologi konstruksi rendah karbon.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan kerangka LCA dengan batas sistem *cradle-to-site* untuk membandingkan jejak karbon perkerasan lentur dan kaku pada proyek peningkatan jalan berskala desa. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak mengkaji proyek infrastruktur besar atau berfokus pada evaluasi teknis dan ekonomi, penelitian ini mengintegrasikan aspek lingkungan dalam konteks pembangunan infrastruktur lokal. Selain membandingkan total emisi antara kedua jenis perkerasan, penelitian ini juga mengidentifikasi kontribusi setiap tahapan siklus hidup, yaitu produksi material, transportasi, dan aktivitas konstruksi. Pendekatan tersebut memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai distribusi sumber emisi karbon pada proyek pembangunan perkerasan jalan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi total jejak karbon pada sistem perkerasan lentur dan kaku menggunakan metode *Life Cycle Assessment* dengan batas sistem *cradle-to-site*, membandingkan kontribusi emisi dari kedua jenis perkerasan, serta mengidentifikasi sumber utama emisi karbon pada Proyek Peningkatan Jalan Wawali. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan kajian mengenai evaluasi lingkungan pada infrastruktur jalan melalui penerapan metode LCA. Secara praktis, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi perencana konstruksi, insinyur, dan pembuat kebijakan dalam menyusun strategi pembangunan jalan rendah karbon. Temuan penelitian juga diharapkan dapat mendukung pengambilan keputusan masa depan melalui pemilihan material yang lebih berkelanjutan, pengelolaan logistik yang lebih efisien, serta pembangunan infrastruktur yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus untuk mengevaluasi dampak lingkungan berupa jejak karbon pada pembangunan perkerasan jalan. Objek penelitian adalah Proyek Peningkatan Jalan Wawali di Desa Wioi, Kabupaten Minahasa Tenggara, dengan ruang lingkup analisis pada segmen jalan sepanjang 100 meter, yaitu STA

0+400 hingga STA 0+500. Populasi data dalam penelitian ini mencakup seluruh aktivitas konstruksi yang berpotensi menghasilkan emisi karbon pada proyek pembangunan jalan, meliputi kebutuhan material, aktivitas transportasi, serta penggunaan alat berat selama proses konstruksi. Sampel penelitian ditentukan secara *purposive sampling* dengan memilih segmen STA 0+400 hingga STA 0+500 karena pada lokasi tersebut terdapat kombinasi pekerjaan perkerasan lentur pada badan jalan dan perkerasan kaku pada bagian bahu jalan beton sehingga memungkinkan dilakukan perbandingan emisi karbon dari kedua jenis perkerasan dalam kondisi proyek yang sama.

Instrumen penelitian yang digunakan berupa dokumen teknis proyek dan basis data faktor emisi untuk mendukung proses perhitungan jejak karbon. Instrumen pengumpulan data meliputi *shop drawing* untuk memperoleh informasi dimensi teknis pekerjaan, Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk menghitung volume kebutuhan material dan durasi operasional alat berat, serta data jarak tempuh transportasi material dari lokasi *quarry* menuju lokasi proyek. Validitas data dilakukan melalui verifikasi kesesuaian dokumen teknis proyek dengan kondisi pekerjaan yang dianalisis, sedangkan reliabilitas data dijaga melalui penggunaan standar faktor emisi yang telah diakui secara internasional, yaitu *Inventory of Carbon & Energy* (ICE Database) serta pedoman emisi gas rumah kaca IPCC/DESNZ. Karena penelitian menggunakan data sekunder berbasis dokumen proyek dan faktor emisi standar, pengujian validitas dan reliabilitas dilakukan melalui validasi sumber data, konsistensi parameter perhitungan, serta kesesuaian metode analisis dengan prinsip *Life Cycle Assessment* (LCA).

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui metode dokumentasi dengan mengumpulkan data sekunder berupa gambar kerja, RAB, data kebutuhan material, durasi penggunaan alat berat, serta informasi transportasi material. Prosedur penelitian dimulai dengan menentukan ruang lingkup analisis menggunakan batas sistem *cradle-to-site*, kemudian melakukan inventarisasi data material, transportasi, dan aktivitas konstruksi. Selanjutnya dilakukan perhitungan emisi karbon menggunakan metode analisis berbasis faktor emisi (*emission factor*), yaitu dengan mengalikan jumlah kebutuhan material dengan faktor emisi bawaan, serta menghitung emisi dari konsumsi bahan bakar alat berat dan kendaraan pengangkut material. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolah data numerik untuk mendukung perhitungan matematis dan komparasi hasil emisi. Teknik analisis data menggunakan pendekatan LCA dengan membandingkan total emisi karbon antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada tiga tahapan utama, yaitu produksi material, transportasi, dan aktivitas konstruksi di lapangan. Hasil analisis kemudian digunakan untuk mengidentifikasi jenis perkerasan dengan kontribusi emisi lebih rendah serta menentukan tahapan siklus hidup yang menjadi sumber emisi karbon terbesar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

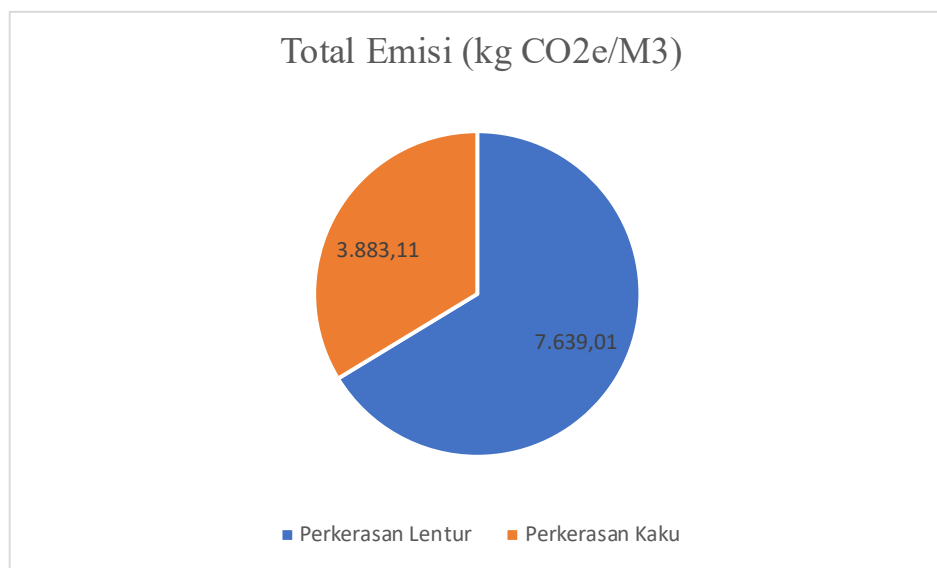
Kerangka analisis LCA pada studi kasus ini dipecah menjadi tiga fase utama untuk mengidentifikasi distribusi emisi secara rinci, yaitu fase produksi material, fase transportasi, dan fase transportasi konstruksi di lapangan. Berdasarkan hasil data volumetrik dan perhitungan faktor emisi, didapatkan bahwa total akumulasi jejak karbon pada proyek segmen 100 meter tersebut mencapai 11.522,12 kgCO₂e. Rincian distribusi emisi dari setiap tahapan pekerjaan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Emisi

Fase Siklus Hidup (LCA)	Perkerasan Lentur (kgCO ₂ e)	Perkerasan Kaku (kgCO ₂ e)	Kontribusi (%)
Fase Produksi	2.972,20	3.022,03	52%
Fase Transportasi	4.530,16	694,19	45%
Fase Konstruksi	136,65	166,90	3%
Total Keseluruhan	7.639,01	3.883,11	100%

Sumber: Hasil Analisis Data (2026)

Merujuk pada data tersebut, fase produksi menjadi penyumbang jejak karbon terbesar dengan total 5.994,23 kgCO₂e atau menyumbang 52% dari total emisi keseluruhan. Posisi kedua ditempati oleh fase transportasi sebesar 45% (5.224,34 kgCO₂e). Data ini memberikan justifikasi ilmiah bahwa dominasi emisi tidak terjadi pada saat alat berat beroperasi di lokasi proyek, melainkan pada tahap pabrikan di hulu. Tingginya persentase pada fase produksi didorong oleh konsumsi energi termal yang sangat besar pada saat proses kalsinasi material semen dan pemanasan agregat aspal di fasilitas *Asphalt Mixing Plant* (AMP). Hal ini sejalan dengan berbagai temuan terdahulu yang menegaskan bahwa material konstruksi hulu selalu memegang proporsi *embodied carbon* tinggi akibat proses manufaktur yang padat energi.



Gambar 1. Perbandingan Emisi dari dua perkerasan

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian (2026)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa emisi karbon perkerasan lentur hampir dua kali lebih besar dibandingkan perkerasan kaku. Perbedaan nilai tersebut terutama dipengaruhi oleh kebutuhan energi pada proses produksi aspal dan aktivitas transportasi material. Hasil ini memperlihatkan bahwa pendekatan LCA mampu memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai dampak lingkungan dibandingkan evaluasi yang hanya mempertimbangkan tahap konstruksi akhir.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa fase produksi material menjadi sumber emisi terbesar dengan kontribusi sebesar 52% atau sekitar 5.994,23 kgCO₂e. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar emisi tidak berasal dari aktivitas alat berat di lokasi

proyek, melainkan berasal dari proses manufaktur material sebelum digunakan dalam konstruksi. Tingginya kontribusi fase produksi berkaitan dengan kebutuhan energi dalam proses pengolahan bahan baku, terutama pemanasan agregat aspal dan proses produksi material berbasis semen.

Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa perkerasan lentur memiliki kontribusi emisi lebih besar pada fase transportasi dibandingkan perkerasan kaku. Fase transportasi pada perkerasan lentur menghasilkan emisi sebesar 4.530,16 kgCO₂e, sementara perkerasan kaku hanya menghasilkan 694,19 kgCO₂e. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik material dan kebutuhan logistik sangat menentukan besarnya emisi yang dihasilkan. Material yang membutuhkan proses pengolahan kompleks dan distribusi lebih intensif cenderung menghasilkan jejak karbon yang lebih besar.

Pada fase konstruksi, kedua jenis perkerasan menunjukkan kontribusi emisi yang relatif rendah dibandingkan fase produksi dan transportasi. Perkerasan lentur menghasilkan 136,65 kgCO₂e, sedangkan perkerasan kaku menghasilkan 166,90 kgCO₂e. Meskipun demikian, hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan alat berat tetap memberikan kontribusi terhadap emisi karbon sehingga efisiensi operasional peralatan konstruksi tetap diperlukan dalam strategi pembangunan rendah karbon.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Thives dan Ghisi (2017) yang menjelaskan bahwa produksi campuran aspal membutuhkan konsumsi energi tinggi akibat proses pemanasan agregat dan bahan pengikat. Tingginya kebutuhan energi tersebut menyebabkan campuran aspal memiliki kontribusi emisi karbon yang signifikan. Temuan penelitian ini memperkuat bahwa proses produksi material merupakan salah satu faktor dominan dalam pembentukan *embodied carbon* pada konstruksi jalan.

Selanjutnya, penelitian Gouveia et al. (2022) menegaskan bahwa penerapan metode LCA pada infrastruktur jalan mampu mengidentifikasi sumber utama dampak lingkungan dari setiap tahapan siklus hidup. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut karena pendekatan LCA berhasil menunjukkan bahwa fase produksi dan transportasi menjadi sumber emisi dominan dibandingkan aktivitas konstruksi langsung.

Penelitian Zheng et al. (2023) juga menunjukkan bahwa produksi material dan transportasi memiliki pengaruh signifikan terhadap total emisi karbon pembangunan jalan. Kesamaan hasil tersebut memperlihatkan bahwa strategi pengurangan karbon tidak cukup hanya dilakukan pada tahap konstruksi, tetapi harus dimulai sejak pemilihan material, rantai pasok, dan sistem distribusi logistik.

Namun demikian, penelitian ini memiliki kontribusi berbeda dibandingkan penelitian sebelumnya karena dilakukan pada skala proyek jalan desa. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada proyek jalan tol atau infrastruktur besar, sedangkan penelitian ini memberikan gambaran mengenai bagaimana pendekatan LCA dapat diterapkan pada proyek lokal dengan sumber daya dan karakteristik konstruksi yang berbeda. Hal tersebut menjadi kontribusi penting dalam memperluas penerapan kajian keberlanjutan pada berbagai skala pembangunan infrastruktur.

Berdasarkan hasil analisis, strategi pengurangan emisi karbon perlu diarahkan pada tahapan yang memberikan kontribusi terbesar, yaitu produksi material dan transportasi. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah penggunaan teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA)

untuk menurunkan temperatur produksi aspal sehingga konsumsi energi dapat dikurangi. Selain itu, penggunaan material substitusi seperti *fly ash* pada campuran beton juga dapat menjadi alternatif untuk menekan emisi dari penggunaan semen.

Temuan penelitian ini juga memiliki keterkaitan dengan teori pembangunan berkelanjutan (*sustainable development theory*) yang menekankan keseimbangan antara kebutuhan pembangunan ekonomi, perlindungan lingkungan, dan keberlanjutan sumber daya. Dalam konteks pembangunan jalan, penerapan LCA menjadi instrumen pengambilan keputusan yang memungkinkan pemangku kepentingan mempertimbangkan dampak lingkungan secara objektif sebelum menentukan alternatif desain konstruksi.

Secara praktis, hasil penelitian memberikan implikasi bagi pemerintah daerah, konsultan konstruksi, dan pelaksana proyek dalam merancang pembangunan jalan yang lebih ramah lingkungan. Pemilihan jenis perkerasan sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan biaya awal dan kekuatan struktural, tetapi juga mempertimbangkan dampak karbon sepanjang siklus hidupnya. Integrasi evaluasi karbon dalam dokumen perencanaan seperti Rencana Anggaran Biaya Lingkungan (RABL) dapat menjadi langkah strategis dalam mendukung pembangunan infrastruktur rendah karbon.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan LCA memberikan informasi penting mengenai distribusi sumber emisi dalam pembangunan jalan. Perkerasan kaku menunjukkan kinerja lingkungan kumulatif yang lebih baik pada batas sistem *cradle-to-site* dibandingkan perkerasan lentur karena menghasilkan total emisi lebih rendah. Meskipun demikian, upaya pengurangan karbon tetap perlu dilakukan pada seluruh tahapan siklus hidup melalui inovasi material, efisiensi transportasi, dan optimalisasi proses konstruksi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan batas sistem *cradle-to-site* mampu mengidentifikasi distribusi jejak karbon pada pembangunan perkerasan lentur dan perkerasan kaku di Proyek Peningkatan Jalan Wawali, Desa Wioi. Hasil analisis menunjukkan bahwa total akumulasi emisi karbon yang dihasilkan dari tahapan produksi material, transportasi, dan aktivitas konstruksi mencapai 11.522,12 kgCO_{2e}. Perkerasan lentur menghasilkan kontribusi emisi yang lebih tinggi sebesar 7.639,01 kgCO_{2e}, sedangkan perkerasan kaku menghasilkan emisi sebesar 3.883,11 kgCO_{2e}, sehingga perkerasan kaku menunjukkan kinerja lingkungan kumulatif yang lebih baik pada batas analisis *cradle-to-site*. Berdasarkan tahapan siklus hidup, fase produksi material menjadi sumber emisi terbesar dengan kontribusi sebesar 52%, kemudian fase transportasi sebesar 45%, dan fase konstruksi sebesar 3%. Temuan ini menunjukkan bahwa sumber utama emisi karbon pada pembangunan jalan tidak hanya berasal dari aktivitas konstruksi di lapangan, tetapi lebih dominan berasal dari proses hulu, terutama produksi material dan sistem logistik. Oleh karena itu, perencanaan infrastruktur jalan berkelanjutan perlu mempertimbangkan aspek lingkungan sejak tahap pemilihan material, proses produksi, hingga distribusi material menuju lokasi proyek.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan analisis LCA dengan memasukkan seluruh tahapan siklus hidup perkerasan, seperti fase operasional, pemeliharaan, rehabilitasi, hingga tahap akhir masa layanan (*end-of-life*), sehingga diperoleh gambaran

dampak lingkungan yang lebih menyeluruh. Selain itu, penelitian mendatang dapat dilakukan pada berbagai jenis proyek jalan, kondisi geografis, serta variasi material konstruksi untuk meningkatkan validitas dan penerapan hasil penelitian pada skala yang lebih luas. Kajian berikutnya juga dapat mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi emisi karbon, seperti penggunaan teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA), pemanfaatan material alternatif rendah karbon seperti *fly ash*, serta optimalisasi sistem transportasi material. Integrasi analisis biaya lingkungan melalui pendekatan seperti Rencana Anggaran Biaya Lingkungan (RABL) juga direkomendasikan agar keputusan pembangunan infrastruktur tidak hanya mempertimbangkan aspek ekonomi dan teknis, tetapi juga dampak terhadap perubahan iklim dan keberlanjutan lingkungan.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Jecky Umboh: konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, pelaksanaan eksperimen, pengumpulan data, analisis data, penyusunan manuskrip, dan revisi manuskrip. Beldie Aryona Tombeg dan Dian Puspita Sari: supervisi penelitian, validasi hasil penelitian, pemberian masukan ilmiah, serta peninjauan dan revisi manuskrip. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa, memperbaiki tata bahasa, dan menyempurnakan struktur penulisan. AI generatif tidak digunakan untuk menghasilkan, memanipulasi, atau menganalisis data penelitian. Seluruh isi manuskrip telah ditinjau dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas keakuratan, integritas, dan isi akhir manuskrip.

REFERENSI

- Abisono, F. G. (2024). Di bawah bayang-bayang perubahan iklim: Transformasi negara pembangunan dan agenda transisi energi di Indonesia. *Politika: Jurnal Ilmu Politik*, 15(1), 95–118.
- Adi, W. B., Adiansyah, J. S., & Muladi, A. (2024). Evaluasi Jejak Karbon Produk Tahu di Kelurahan Abian Tubuh Kota Mataram Menggunakan Pendekatan Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment). *J. Ilmu Lingkung*, 22(2), 439–446.
- Afra, L., Abdullah, Z., Usrina, N., Anna, K., Pramanda, H., & Satyadharma, M. (2026). *Dasar-dasar perencanaan transportasi: Pendekatan terpadu untuk sistem transportasi*. Kamiya Jaya Aquatic.

- Apriliyaningsih, S., Saepudin, E. A., Putri, R. A., Karmelia, A., & Sandi, M. R. (2025). Kebijakan Pembangunan Infrastruktur Jalan Tol Evaluasi Dampak Pembangunan Jalan Tol Terhadap Peningkatan Konektivitas Antar Daerah, Pertumbuhan Ekonomi Regional, serta Dampaknya Terhadap Masyarakat dan Lingkungan Hidup. *Ekopedia: Jurnal Ilmiah Ekonomi*, 1(2), 44–53.
- Efendi, Z. (2024). Strategi Pembangunan Berkelanjutan dalam Perencanaan Daerah untuk Menghadapi Perubahan Iklim Global. *Indonesian Journal of Research and Service Studies*, 1(4), 198–209.
- Ervianto, W. I. (2024). *Buku Panduan Konstruksi Hijau Untuk Proyek Gedung di Indonesia*. Penerbit Andi.
- Fistcar, W. A. (2020). Implementasi life cycle assessment (LCA) pada pemilihan perkerasan kaku dan lentur konstruksi jalan tol Balikpapan-Samarinda. Retrieved from ResearchGate.
- Gouveia, B. G., Donato, M., & da Silva, M. A. V. (2022). Life cycle assessment in road pavement infrastructures: A review. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1304–1315.
- Indarto, B. A., Ani, D. A., Tantra, A. R., & Jayanti, F. D. (2024). Pengembangan Model Pengukuran dan Pelaporan Carbon Footprint di Bidang Green Accounting dalam Transisi Menuju Ekonomi Rendah Karbon. *Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi, Bisnis Digital, Ekonomi Kreatif, Entrepreneur (JEBDEKER)*, 5(1), 119–130.
- Jannah, M., & Kurniati, E. (2025). Analisis Peran Pemerintah Daerah Terhadap Pembangunan Infrastruktur Sebagai Upaya Mendorong Pertumbuhan Ekonomi Di Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmu Ekonomi*, 4(1), 231–251.
- Mahendra, R., & Firmansyah, F. (2025). Peran infrastruktur transportasi dalam pertumbuhan ekonomi: Bukti empiris di lima negara ASEAN. *Indicators: Journal of Economic and Business*, 7(2), 68–75.
- Melati, W. Z., Sinta, Y., Ilahi, Z. R., & Malik, A. (2025). Evaluasi Dampak Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan dari Proyek Infrastruktur di Indonesia. *Kalianda Halok Gagas*, 8(1), 17–24.
- Mulyana, A., & Wirahadikusumah, R. D. (2017). Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Tahap Konstruksi Studi Kasus: Konstruksi Jalan Cisumdawu. *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 24(3), 269–280.
- Pandarangga, A., HA, R., & Dwi Hatmoko, J. U. (2015). *Konseptualisasi Rantai Pasok Penyelenggaraan Material Dan Peralatan Konstruksi Pada Industri Konstruksi Di Indonesia*. Doctor Program in Civil Engineering.
- Pratama, M. A. A. P. (2026). Peran Infrastruktur Berkelanjutan dalam Meningkatkan Ketahanan Kota terhadap Perubahan Iklim: Kajian Literatur. *Jurnal Rekayasa Sipil & Infrastruktur*, 1(1), 15–21.
- Putri, D. A. K., Khalfani, M. R., Radinka, M. R., & Nirwana, N. S. (2025). Transformasi infrastruktur transportasi untuk meningkatkan konektivitas Dan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan Di Jakarta. *Integrative Perspectives of Social and Science Journal*, 2(03 Juli), 4788–4799.
- Ramadhani, A. P., & Nasution, A. R. (2026). Analisis Konseptual Investasi Hijau Dalam Mendukung Pembangunan Ekonomi Berkelanjutan. *Indonesian Journal of Innovation Multidisipliner Research*, 4(2), 2642–2648.
- Sibali, A., Erhanuddin, E., & Jainuddin, J. (2025). Dampak Pembangunan Infrastruktur Terhadap Peningkatan Ekonomi Masyarakat Pesisir Kepulauan Selayar. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 5(1), 302–308.
- Singh, A., Srivastava, V., & Tiwari, A. K. (2023). Carbon footprint estimation of highway construction materials. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 12(4), 22–34.
- Sjafruddin, A. (2013). Pembangunan Infrastruktur Transportasi untuk Menunjang

- Pembangunan Berkelanjutan Berbasis Ilmu Pengetahuan. *Makalah. Bandung: Institut Teknologi Bandung, Fakultas Teknik Sipil Dan Lingkungan.*
- Tampubolon, D., Sayid Abas, S. E., Atmaja, I. U., Endri Purnomo, S. E., Ak, M., Nurhayati, S. E., Rineliana, S. E., Heppi Syofya, S. E., Mustam, S. P., & Hasanuddin Djumakking, S. E. (2025). *Dinamika Pertumbuhan Ekonomi*. CV Rey Media Grafika.
- Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473–484.
- Wahyudi, J. (2017). Penerapan life cycle assessment untuk menakar emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas produksi tahu. *URECOL*, 475–480.
- Werastuti, D. N. S. (2026). *AKUNTANSI KARBON Mengukur Jejak Emisi, Membangun Masa Depan Berkelanjutan*. PT Insight Pustaka Nusa Utama.
- Wibowo, A. (2024). Peluang Indonesia dalam Pasar Karbon Global: Strategi Menjadi Pemain Kunci di Asia Tenggara. *Prosiding Seminar Sosial Politik, Bisnis, Akuntansi Dan Teknik*, 6, 230–242.
- Yuliyanto, A., Prayogi, G. R., Syahputra, D., P., K., & Kurniawan, A. C. (2025). Evaluasi emisi gas rumah kaca warm mix asphalt metode life cycle assessment. *Jurnal Jalan Jembatan*, 42(2).
- Zheng, L., Li, Y., Qian, C., & Du, Y. (2023). Carbon emission evaluation of roadway construction at contaminated sites based on life cycle assessment method. *Sustainability*, 15(16), 12642.