



Tren Emisi Karbon Pekerjaan Earthwork di Indonesia: Review LCA & Implikasi K3

Agus Priyanto¹, Rizka Mawandani², Cynthia Febrina Maharani³

Universitas Binawan, Indonesia^{1,2,3}

Email: agus.priyanto@student.binawan.ac.id¹

Abstrak

Penelitian ini menganalisis tren emisi karbon pada pekerjaan *earthwork* di Indonesia menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR). Penapisan literatur dijalankan secara rigid mengacu pada protokol PRISMA 2020 dengan sumber basis data yang diekstraksi dari *Google Scholar*, *Scopus*, *SINTA*, dan *Garuda* pada rentang publikasi tahun 2020 – 2 Juni 2026. Berdasarkan kriteria inklusi yang ketat, diperoleh 13 artikel utama domestik yang relevan untuk dianalisis. Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan *gate-to-gate* menjadi batasan metode LCA yang paling dominan diimplementasikan pada sektor konstruksi di Indonesia karena kepraktisan aplikasinya pada fase pelaksanaan konstruksi di lapangan. Aktivitas operasional alat berat berbahan bakar diesel, kegiatan pengangkutan material (*hauling*), serta inefisiensi konsumsi energi proyek diidentifikasi sebagai kontributor utama dalam pelepasan emisi karbon pada *earthwork* yang mana menyumbang 18% dari total emisi. Temuan ini berimplikasi pada peningkatan risiko paparan polutan udara bagi pekerja konstruksi, sehingga pengendalian emisi perlu diintegrasikan dalam manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) proyek. Selain itu, pemanfaatan perangkat lunak seperti *OpenLCA* dan basis data emisi terintegrasi terbukti mampu meningkatkan akurasi estimasi beban lingkungan. Hasil sintesis ini menegaskan pentingnya standardisasi basis data inventori emisi lokal guna mendukung kebijakan konstruksi berkelanjutan dan pencapaian target dekarbonisasi di Indonesia. Penelitian ini memberikan kontribusi orisinal dengan mensintesis peta jalan dekarbonisasi yang terintegrasi langsung dengan parameter perlindungan kesehatan pekerja, mengisi kekosongan literatur yang selama ini memisahkan aspek lingkungan dan keselamatan.

Kata Kunci: *life cycle assessment*, *earthwork*; emisi karbon; alat berat; konstruksi berkelanjutan; keselamatan dan kesehatan kerja

Abstract

This study analyzes carbon emission trends in Indonesian earthwork operations utilizing a Life Cycle Assessment (LCA) approach through a Systematic Literature Review (SLR). A rigid literature screening process was conducted in accordance with the PRISMA 2020 protocol, with data extracted from Google Scholar, Scopus, SINTA, and Garuda databases spanning the 2020 - 2 June 2026 publication window. Based on strict inclusion criteria, 13 core domestic articles were selected for analysis. The findings reveal that the gate-to-gate approach is the most dominant LCA system boundary implemented in the Indonesian

construction sector due to its practical application during the on-site construction phase. Diesel-powered heavy equipment operations, material hauling activities, and project energy consumption inefficiencies were identified as the primary contributors to carbon emissions in earthworks, accounting for 18% of total emissions. These findings imply an increased risk of air pollutant exposure for construction workers, underscoring the need to integrate emission control into project Occupational Health and Safety (OHS) management. Furthermore, the utilization of software such as OpenLCA alongside integrated emission databases has proven effective in enhancing the accuracy of environmental load estimations. This synthesis highlights the critical importance of standardizing local emission inventory databases to support sustainable construction policies and achieve decarbonization targets in Indonesia. This study provides an original contribution by synthesizing a decarbonization roadmap directly integrated with worker health protection parameters, bridging the gap in the existing literature that has historically separated environmental and safety aspect.

Keywords: *life cycle assessment; earthwork; carbon emission; heavy equipment; sustainable construction; occupational health and safety*

PENDAHULUAN

Emisi karbon dioksida (CO₂) yang merepresentasikan struktur utama Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer global merupakan determinan utama yang memicu akselerasi fenomena pemanasan global dan krisis iklim antropogenik. Di tengah laju urbanisasi, sektor industri konstruksi muncul sebagai salah satu kontributor makro terhadap degradasi kualitas lingkungan, di mana secara global sektor ini mengonsumsi sekitar 32% dari total pasokan energi dan bertanggung jawab atas 34% emisi CO₂ yang terkait langsung dengan operasional energi (Kusuma et al., 2025).

Pada konteks domestik, sektor konstruksi di Indonesia menyumbang sebesar 24,6% dari akumulasi emisi GRK nasional (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2023). Beban lingkungan tersebut secara historis didominasi oleh jejak karbon dari proses manufaktur material primer seperti semen serta intensitas konsumsi energi fosil selama fase pelaksanaan konstruksi berlangsung di lapangan (Panguriseng et al., 2026).

Sebagai subsistem esensial dalam siklus pelaksanaan konstruksi infrastruktur, tahapan pekerjaan tanah (*earthwork*) memegang peranan krusial sebagai konsumen bahan bakar fosil dalam volume yang masif. Karakteristik operasional pekerjaan tanah melibatkan mobilisasi kendaraan berat dalam frekuensi tinggi guna mengeksekusi aktivitas mekanis, yang mencakup penggalian (*digging*) oleh ekskavator, pemindahan material (*loading*) oleh *wheel loader*, hingga pengangkutan jarak jauh (*hauling*) menggunakan *dump truck* menuju tapak pembuangan (Ramadhan & Utomo, 2023). Ketergantungan

yang tinggi pada armada *heavy equipment* konvensional ini secara langsung berimplikasi pada tingginya emisi karbon sektoral.

Meskipun penetrasi teknologi elektrifikasi kendaraan telah berkembang secara masif pada sektor transportasi publik dan mobilitas privat, proses transisi energi bersih pada sektor konstruksi, khususnya pada peralatan kerja kategori *heavy-duty*, masih mengalami stagnasi dan ketertinggalan yang signifikan. Urgensi penelitian ini semakin mendesak mengingat hingga tahun 2026, Indonesia masih belum memiliki National LCI Database, sehingga mayoritas studi nasional terpaksa mengandalkan data luar negeri yang kurang akurat dalam merepresentasikan dinamisme operasional riil di lapangan (Kurnia et al., 2022; Suh & Lippiatt, 2022).

Mayoritas mesin operasional pada pekerjaan *earthwork* di Indonesia masih mengandalkan motor bakar diesel sebagai penggerak mekanis utama. Konsekuensinya, pembakaran diesel tersebut melepaskan polutan udara berbahaya secara konstan, seperti Nitrogen Oksida (NO_x), Hidrokarbon (HC), Karbon Monoksida (CO), serta materi partikulat halus (PM 2.5) yang berisiko merusak kestabilan ekosistem lokal lingkungan kerja. Oleh karena itu, evaluasi terukur terhadap konsumsi energi operasional alat berat menjadi instrumen mendesak untuk meningkatkan parameter keberlanjutan pada proyek infrastruktur (Kurnia et al., 2022).

Salah satu metodologi standardisasi internasional yang diakui secara saintifik untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu sistem produk atau aktivitas secara komprehensif adalah *Life Cycle Assessment* (LCA), yang regulasinya telah dibakukan melalui ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2017 (International Organization for Standardization, 2006, 2017). Melalui pendekatan LCA, estimasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu aktivitas dapat dikuantifikasi ke dalam berbagai kategori dampak lingkungan global seperti *Global Warming Potential* (GWP), *acidification*, *eutrophication*, hingga tingkat toksisitas manusia (Abdulloh et al., 2026).

Namun, Penelitian *Life Cycle Assessment* (LCA) di sektor konstruksi Indonesia saat ini masih didominasi oleh evaluasi material arsitektur dan struktur gedung (Rakhmawati et al., 2020), inovasi beton ramah lingkungan (Allo et al., 2026), serta komparasi perkerasan pada infrastruktur jalan raya (Fistcar, 2020). Sebaliknya, studi kritis yang secara spesifik membedah profil emisi karbon pada pekerjaan *earthwork* dan manajemen mekanisasi alat berat masih sangat terbatas dan terfragmentasi. Hingga 2026, Indonesia belum

memiliki National LCI *Database*, sehingga 80% studi menggunakan *Ecoinvent* (Kurnia et al., 2022).

Pada umumnya estimasi emisi di lapangan masih menggunakan pendekatan kalkulasi statis yang mengabaikan variabel dinamisme operasional riil alat berat, seperti pengaruh *idle time* dan variasi beban kerja aktual. Atas dasar kesenjangan riset tersebut, penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk memetakan dan menganalisis tren emisi karbon khusus pada pekerjaan *earthwork* di Indonesia melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR). Hasil kajian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi orisinal (*novelty*) berupa sintesis komprehensif mengenai peta jalan dekarbonisasi operasional konstruksi di Indonesia.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi aspek emisi karbon pada sektor konstruksi di Indonesia, namun dengan fokus dan batasan yang beragam. Ramadhan & Utomo (2023) mengidentifikasi bahwa aktivitas *earthwork* menempati peringkat kedua terbesar sebagai penyumbang emisi pada proyek jalan raya nasional menggunakan faktor emisi IPCC 2006, namun belum memperhitungkan faktor penurunan performa mesin alat berat tua. Kurnia et al. (2022) mengkuantifikasi total emisi GRK fase konstruksi jembatan flyover sebesar 234.946 kg CO₂-eq dengan pendekatan *gate-to-gate*, tetapi mengabaikan variabel efisiensi bahan bakar akibat *idle time*.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang belum ditemukan dalam literatur domestik maupun internasional. Berbeda dengan studi-studi sebelumnya yang memisahkan aspek dampak lingkungan dan keselamatan kerja, penelitian ini secara orisinal mensintesis peta jalan dekarbonisasi operasional *earthwork* yang terintegrasi langsung dengan parameter perlindungan kesehatan pekerja. Selain itu, kajian ini menyediakan analisis komparatif terstruktur terhadap 13 artikel primer domestik yang dipetakan berdasarkan batasan sistem LCA, instrumen kalkulasi, dan kesenjangan riset, sehingga menghasilkan kerangka rekomendasi yang holistik bagi pengembangan riset dan kebijakan konstruksi berkelanjutan di Indonesia.

Pada skala internasional, Hong (2022) telah menerapkan simulasi kejadian diskret untuk mengoptimalkan operasional alat berat, sementara Arduin et al. (2022) melakukan tinjauan sistematis terhadap LCA pada teknik konstruksi berbasis tanah. Meskipun demikian, belum terdapat studi yang secara komprehensif mensintesis hubungan antara profil emisi karbon

earthwork dengan implikasi terhadap kesehatan dan keselamatan pekerja konstruksi di Indonesia.

Penelitian ini memiliki manfaat ganda, baik secara teoretis maupun praktis. Secara teoretis, kajian ini memperkaya korpus pengetahuan mengenai aplikasi *Life Cycle Assessment* pada subsektor pekerjaan tanah di negara berkembang, khususnya dalam konteks ketiadaan *National LCI Database*. Secara praktis, hasil sintesis ini dapat dijadikan acuan oleh praktisi manajemen proyek konstruksi dalam merancang strategi mitigasi emisi yang terintegrasi dengan sistem manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), serta oleh pengambil kebijakan dalam menyusun regulasi konstruksi berkelanjutan yang berbasis bukti ilmiah.

Implikasi penelitian ini mencakup tiga dimensi strategis. Pertama, pada dimensi lingkungan, temuan ini mendorong percepatan pengembangan basis data inventori emisi nasional yang merepresentasikan kondisi operasional riil di Indonesia. Kedua, pada dimensi kesehatan kerja, kajian ini menegaskan kebutuhan mendesak untuk mengintegrasikan parameter paparan polutan udara dari aktivitas *earthwork* ke dalam protokol penilaian risiko K3 proyek. Ketiga, pada dimensi teknologi, hasil penelitian ini memvalidasi efektivitas integrasi *Building Information Modeling* dengan perangkat lunak LCA profesional sebagai instrumen pendukung keputusan dekarbonisasi.

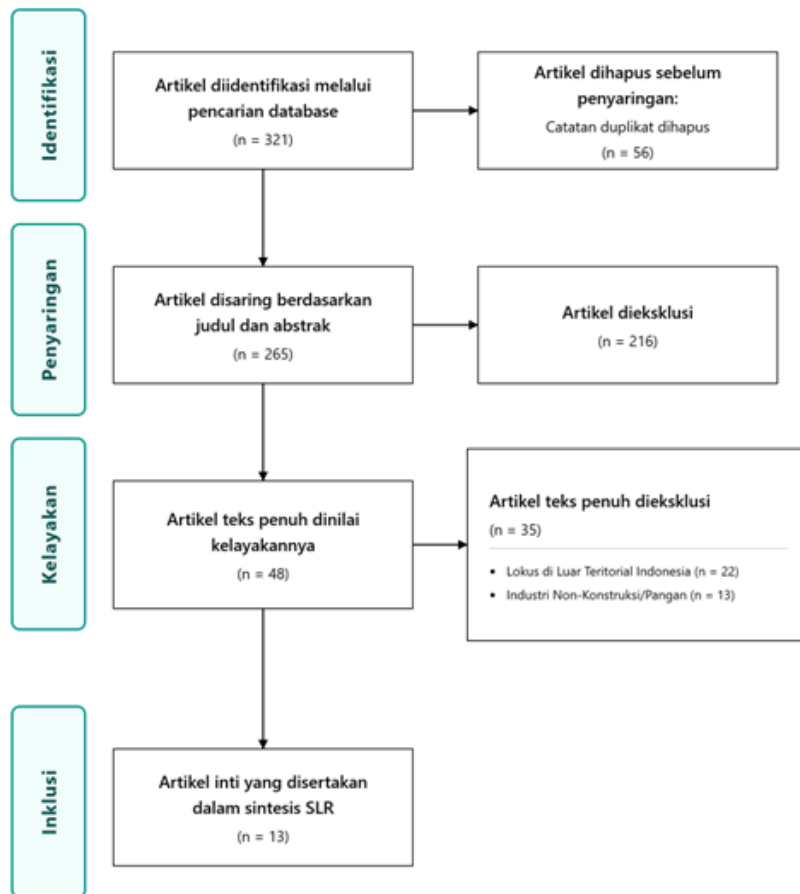
METODE

Penelitian ini menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengadopsi secara ketat kerangka kerja *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) versi terbaru 2020 (Page et al., 2021). Implementasi metode ini ditujukan untuk meminimalkan risiko bias subjektif penulis sekaligus menjamin transparansi dan replikabilitas proses identifikasi, evaluasi, serta sintesis draf literatur yang mengulas evaluasi dampak lingkungan pada fase pekerjaan tanah.

Langkah awal dalam studi ini diawali dengan merumuskan pertanyaan penelitian (*Research Questions*) untuk mengarahkan proses sintesis, yaitu: (1) Bagaimana tren distribusi metodologi dan batasan sistem (*system boundary*) LCA konstruksi yang diterapkan di Indonesia? (2) Faktor operasional apa saja yang menjadi kontributor emisi karbon dominan pada pekerjaan *earthwork*? Serta (3) Bagaimana instrumen perangkat lunak digunakan dalam meningkatkan akurasi estimasi emisi karbon tersebut?

Strategi penelusuran literatur dilakukan secara elektronik pada empat basis data ilmiah terindeks, yaitu *Scopus*, *Google Scholar*, SINTA, dan Garuda, dengan batasan waktu publikasi artikel dari tahun 2020 hingga 2 Juni 2026. Formulasi kata kunci (*search string*) dirancang dengan mengombinasikan operator Boolean sebagai berikut: "*Life Cycle Assessment*" OR "*LCA*" AND "*Earthwork*" AND "*Carbon Emission*" OR "*Global Warming Potential*" AND "*Heavy Equipment*" AND "*Indonesia*".

Kriteria inklusi yang ditetapkan mengharuskan artikel bertipe *peer-reviewed journal* atau prosiding ilmiah, ditulis dalam Bahasa Indonesia atau Bahasa Inggris, menyajikan data kuantitatif jejak karbon konstruksi, dan mengambil lokus studi kasus di teritorial Indonesia. Sebaliknya, kriteria eksklusi diterapkan untuk mengeliminasi artikel konseptual tanpa pengolahan data riil, dokumen bersifat non-jurnal seperti skripsi atau tesis dieliminasi secara ketat guna menjamin otoritas data, sehingga sintesis yang dihasilkan berbasis pada temuan kuantitatif yang telah divalidasi melalui proses penelaahan sejawat, artikel yang mengulas industri non-konstruksi (seperti manufaktur pangan atau komoditas agraria), serta draf studi yang tidak menerapkan kerangka LCA. Seleksi artikel dan ekstraksi data dilakukan oleh dua reviewer secara independen untuk meminimalkan bias. Setiap perbedaan hasil seleksi didiskusikan hingga mencapai konsensus. Apabila tidak tercapai konsensus, reviewer ketiga dilibatkan sebagai penengah.



*Diagram Alir PRISMA 2020
Modifikasi khusus untuk penelitian Systematic Literature Review

Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Seleksi Literatur Berdasarkan Protokol PRISMA 2020

Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian sekunder dengan pendekatan kualitatif-deskriptif. Jenis penelitian yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR), yaitu metode penelitian yang mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasi seluruh bukti penelitian yang relevan untuk menjawab pertanyaan penelitian tertentu secara sistematis, transparan, dan dapat direproduksi (Page et al., 2021). Pendekatan SLR dipilih karena mampu menyediakan sintesis komprehensif terhadap temuan-temuan

empiris yang tersebar di berbagai studi primer, sehingga menghasilkan kesimpulan yang lebih robust dibandingkan tinjauan naratif konvensional.

Desain Penelitian

Desain penelitian mengadopsi kerangka kerja *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) versi 2020 yang terdiri atas empat tahapan utama: identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi (Page et al., 2021). Tahap identifikasi melibatkan pencarian sistematis pada empat basis data ilmiah terindeks. Tahap penyaringan dilakukan melalui evaluasi judul dan abstrak berdasarkan relevansi topik. Tahap kelayakan mencakup pembacaan teks lengkap untuk memverifikasi kesesuaian dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Tahap inklusi menghasilkan korpus final artikel yang akan dianalisis secara mendalam.

Instrumen Penelitian

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah formulir ekstraksi data terstruktur yang dirancang untuk mengumpulkan informasi kunci dari setiap artikel terpilih. Formulir tersebut mencakup variabel-variabel berikut: identitas publikasi (penulis, tahun, jurnal), objek penelitian, batasan sistem LCA yang digunakan, perangkat lunak atau metode kalkulasi emisi, temuan utama penelitian, serta kesenjangan riset yang teridentifikasi. Selain itu, digunakan checklist penilaian kualitas untuk mengevaluasi validitas internal dan eksternal setiap artikel secara sistematis.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur secara elektronik pada empat basis data ilmiah terindeks, yaitu Scopus, Google Scholar, SINTA, dan Garuda, dengan rentang waktu publikasi dari tahun 2020 hingga 2 Juni 2026. Formulasi kata kunci menggunakan kombinasi operator Boolean: "Life Cycle Assessment" OR "LCA" AND "Earthwork" AND "Carbon Emission" OR "Global Warming Potential" AND "Heavy Equipment" AND "Indonesia". Proses seleksi artikel dilakukan secara independen oleh dua reviewer untuk meminimalkan bias subjektif. Setiap perbedaan hasil seleksi didiskusikan hingga mencapai konsensus, dan apabila tidak tercapai kesepakatan, reviewer ketiga dilibatkan sebagai penengah.

Teknik Analisis Data

Analisis data menggunakan metode sintesis naratif tematik, yaitu pendekatan analisis kualitatif yang mengorganisasikan temuan-temuan dari artikel terpilih ke dalam tema-tema konseptual yang saling berkaitan. Empat tema utama yang diidentifikasi dalam proses sintesis meliputi: (1) karakteristik metodologi dan batasan sistem LCA yang diterapkan di Indonesia, (2) identifikasi *hotspot* emisi karbon pada pekerjaan *earthwork*, (3) transformasi instrumen digital dan strategi mitigasi emisi, serta (4) implikasi temuan terhadap manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan temuan antarstudi berdasarkan parameter metodologis dan substansif.

Quality Assessment

Penilaian kualitas (quality assessment) terhadap artikel terpilih dilakukan dengan mengadaptasi kriteria evaluasi kritis untuk studi LCA berdasarkan standar ISO 14044:2017 (International Organization for Standardization, 2017). Setiap artikel dinilai berdasarkan empat dimensi: (1) kejelasan definisi tujuan dan ruang lingkup studi, (2) kelengkapan dan transparansi data inventori siklus hidup, (3) kesesuaian metode penilaian dampak yang digunakan, serta (4) validitas interpretasi hasil. Artikel yang memenuhi minimal tiga dari empat kriteria tersebut dikategorikan sebagai berkualitas tinggi dan dipertahankan dalam korpus analisis. Dari 13 artikel yang lolos seleksi akhir, seluruhnya memenuhi ambang batas kualitas minimum yang ditetapkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan penapisan sistematis menggunakan protokol PRISMA 2020 berhasil mengekstrak 13 artikel primer domestik yang memenuhi seluruh kriteria kelayakan keilmuan lingkungan. Ringkasan karakteristik data dari artikel-artikel tersebut disajikan secara terstruktur pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Matriks Ekstraksi Data Karakteristik Riset LCA dan Emisi Karbon Konstruksi di Indonesia

No	Penulis & Tahun	Objek Penelitian	Batas an Sistem LCA	Software / Metode Perhitungan	Temuan Utama Penelitian	Kesenjangan Riset (Research Gap)
1	(Yuliyanto et al., 2025)	Konstruksi Jalan <i>Warm Mix Asphalt</i>	<i>Gate-to-Gate</i>	Kalkulasi Manual / spreadsheet	Teknologi WMA mereduksi emisi GRK sebesar 3,35–13,65% dibanding metode konvensional	Pembahasan emisi alat berat pada tahapan pemadatan tanah masih terbatas.
2	Roi et al., (2021)	Substitusi Bahan Bakar Alat Berat	<i>Cradle-to-Gate</i>	OpenLCA / Database Lokal	Penggunaan bahan bakar alternatif menurunkan beban emisi gas buang armada mekanis.	Belum diintegrasikan pada alat berat khusus pekerjaan teknik sipil.
3	Kurnia et al., (2022)	Pembangunan Jembatan Flyover	<i>Gate-to-Gate</i>	Perhitungan berbasis Database <i>Ecoinvent</i>	Total emisi GRK fase konstruksi mencapai 234.946 kg CO ₂ -eq.	Variabel efisiensi bahan bakar akibat <i>idle time</i> alat berat diabaikan.
4	Indah & Widyaningsih, (2025)	Implementasi <i>Green Construction</i>	Tinjauan Literatur	Analisis Deskriptif Kualitatif	Penerapan konstruksi hijau di Indonesia masih terkendala	Tidak menyajikan kuantifikasi matematis berbasis inventori LCA.

					regulasi biaya teknis.	
5	Lendra et al., (2022)	Konstruksi Perkerasan Jalan	<i>Cradle-to-Gate</i>	Komparasi Koefisien Emisi	Perkerasan kaku menghasilkan emisi CO ₂ lebih tinggi daripada perkerasan lentur.	Analisis jarak angkut (<i>hauling distance</i>) tanah belum dimodelkan.
6	Abdulloh et al. (2026)	Manajemen Dampak Lingkungan Industri	<i>Cradle-to-Gate</i>	OpenLC A / Kerangka ISO	Kerangka LCA efektif mengidentifikasi <i>hotspot</i> emisi pada siklus energi makro.	Konteks operasional terbatas pada industri energi primer, bukan konstruksi tanah.
7	Peginusa et al., (2025)	Konstruksi Gedung Ramah Lingkungan	<i>Cradle-to-Gate</i>	Kuantifikasi Faktor Emisi	Penerapan konsep struktur hijau mereduksi potensi pemanasan global (GWP) proyek.	Data konsumsi bahan bakar alat berat riil lapangan masih minim.
8	Fistcar, (2020)	Perkerasan Jalan Tol Balikpapan	<i>Gate-to-Gate</i>	Formula Microsoft Excel	Total akumulasi emisi tahap pelaksanaan konstruksi mencapai 208.138 kg CO ₂ -eq	Kurangnya integrasi pemantauan waktu operasional mesin aktual.
9	Agustinigtyas et al., (2025)	Manufaktur Semen & Ready-Mix	<i>Cradle-to-Gate</i>	Analisis Inventori Siklus Hidup	Beton berbasis non-OPC mereduksi embodied carbon	Batasan pengamatan dibatasi pada gerbang pabrik, tidak mengulas

					hingga 58,2%.	fase konstruksi tapak.
10	Ramadhan & Utomo, (2023)	Infrastruktur Jalan Raya Nasional	<i>Gate-to-Gate</i>	Faktor Emisi IPCC 2006	Aktivitas <i>earthwork</i> menempati peringkat kedua terbesar penyumbang emisi proyek.	Belum memperhitungkan faktor penurunan performa mesin alat berat tua.
11	Rakhmawati et al., (2020)	Proses konstruksi struktur gedung bertingkat (fokus pada pekerjaan pengecoran beton).	<i>Cradle-to-Gate</i> hingga tahap pelaksanaan konstruksi di lokasi (<i>Gate-to-Site</i>).	Metode LCA konvensional berbasis faktor emisi karbon.	Pengecoran pelat beton diidentifikasi sebagai tahapan proses yang paling dominan berkontribusi terhadap dampak lingkungan serta emisi gas rumah kaca pada proyek gedung.	Penelitian belum menyentuh manajemen mekanisasi alat berat yang dinamis dan fluktuasi emisi spesifik pada operasional <i>earthwork</i> pra-konstruksi gedung.
12	Pratama & Wijaya, (2024)	Infrastruktur Jembatan Beton	<i>Cradle-to-Grave</i>	Perangkat Lunak OpenLCA	Fase pelaksanaan dan transportasi logistik menyumbang 18% emisi total.	Estimasi data operasional mekanis masih bergantung pada data sekunder.
13	Kusuma et al., (2025)	Pemodelan Emisi Terintegrasi BIM	<i>Gate-to-Gate</i>	Sinkronisasi Model BIM-LCA	Integrasi digital mampu mendeteksi fluktuasi emisi karbon secara	Fokus pemodelan masih terbatas pada komponen struktur gedung vertikal.

Analisis Komparatif Karakteristik Metodologi LCA di Indonesia

Berdasarkan sintesis data terhadap 13 literatur utama, ditemukan kecenderungan metodologis yang kuat di mana batasan sistem (*system boundary*) riset LCA di Indonesia didominasi oleh skema *Gate-to-Gate* dan *Cradle-to-Gate* (Fistcar, 2020; Kurnia et al., 2022; Ramadhan & Utomo, 2023). Pendekatan *Gate-to-Gate* menjadi pilihan populer pada riset domestik karena linear dengan ketersediaan data primer di lapangan, yang mencakup catatan konsumsi bahan bakar harian alat berat dan volume material masuk selama fase konstruksi aktif.

Kondisi ini merepresentasikan kesenjangan operasional jika dibandingkan dengan parameter riset berskala internasional. Di negara-negara maju, metodologi evaluasi dampak lingkungan proyek tanah telah berkembang ke tingkat *Cradle-to-Grave* yang matang dengan tingkat standardisasi framework yang rigid (Song et al., 2020).

Hambatan utama transisi metodologi di Indonesia berakar dari belum tersedianya *National Life Cycle Inventory Database* yang komprehensif untuk sektor konstruksi teknik sipil. Implikasinya, validitas perhitungan riset nasional saat ini masih dibayangi bias ketidakpastian (*uncertainty*) akibat ketergantungan yang tinggi pada faktor emisi konvensional dari luar negeri seperti *database Ecoinvent* milik Eropa (Kurnia et al., 2022).

Identifikasi Hotspot Emisi Karbon pada Pekerjaan Earthwork

Hasil sintesis mengindikasikan bahwa pekerjaan tanah (*earthwork*) berpotensi menjadi *hotspot* atau penyumbang emisi karbon terbesar dalam siklus konstruksi (Ramadhan & Utomo, 2023). Faktor penggerak utama tingginya nilai GWP pada fase geoteknik ini bersumber dari pembakaran bahan bakar diesel dari mesin alat berat *heavy-duty*. Kerangka kerja operasional alat berat di lapangan seperti ekskavator dan buldozer menuntut keluaran daya torsi yang besar secara konstan untuk melakukan penggalian tanah keras, yang berbanding lurus dengan tingginya laju konsumsi solar per jam.

Selain aktivitas pemindahan tanah di tapak proyek, kegiatan pengangkutan material (*hauling*) menuju area pembuangan (*disposal area*) atau dari kuari (*quarry*) merupakan sumber emisi sekunder yang tidak kalah masif (Lendra et al., 2022). Jarak tempuh armada *dump truck* yang panjang dengan beban muatan puncak memicu pemborosan energi fosil yang signifikan. Kajian komparatif global membuktikan bahwa emisi karbon aktual di lapangan riil (*real-world emission*) kerap mengalami lonjakan berkisar antara 15% hingga 40% lebih tinggi dari perhitungan matematis di atas kertas (Hong, 2022; Sekhavati, E. Yengejeh, 2023).

Deviasi ini dipicu oleh faktor operasional seperti tingginya idle time alat berat saat mengantre pengisian material tanah. Fenomena ini menunjukkan bahwa strategi mitigasi emisi harus menyentuh transformasi digital melalui sistem manajemen armada (*fleet management*) untuk meminimalkan pola pergerakan alat yang tidak produktif dan menekan deviasi emisi riil yang mencapai 15% hingga 40%.

Transformasi Instrumen Digital dan Strategi Mitigasi Emisi

Aspek positif yang terekam dalam linimasa tren riset lingkungan di Indonesia adalah terjadinya pergeseran instrumen kalkulasi dampak lingkungan. Riset nasional perlahan mulai meninggalkan pendekatan spreadsheet konvensional (seperti *Microsoft Excel*) dan beralih memanfaatkan perangkat lunak LCA profesional berbasis kode sumber terbuka seperti *OpenLCA* (Abdulloh et al., 2026; Pratama & Wijaya, 2024). Puncak akselerasi metodologi ini ditunjukkan oleh keberhasilan integrasi antara teknologi *Building Information Modeling* (BIM) 4D dengan pangkalan data inventori emisi (Kusuma et al., 2025).

Melalui integrasi BIM-LCA, manajemen proyek dapat melakukan kalkulasi dan visualisasi spasial-temporal jejak karbon semenjak tahapan perancangan maket digital. Pada ranah aplikasi global, efisiensi pekerjaan tanah bahkan telah ditingkatkan akurasi melalui simulasi kejadian diskret (*discrete-event simulation*) untuk meminimalkan pola pergerakan alat berat (Hong, 2022).

Sebagai bagian dari solusi arsitektur berkelanjutan, pemanfaatan teknik konstruksi ramah lingkungan berbasis material tanah padat terkompresi (*compressed earth blocks*) juga mulai diajukan sebagai substitusi struktur penahan tanah konvensional karena terbukti menorehkan angka emisi

terendah (Arduin et al., 2022). Kombinasi instrumentasi digital dan optimalisasi logistik armada *earthwork* menjadi pilar utama dekarbonisasi industri konstruksi nasional di masa depan.

Implikasi terhadap Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Dominasi emisi dari aktivitas operasional alat berat diesel dan *hauling* pada pekerjaan *earthwork* menunjukkan tingginya potensi paparan polutan udara seperti PM2.5 dan NOx di area proyek. Paparan berkelanjutan terhadap polutan ini terbukti meningkatkan risiko gangguan pernapasan dan penyakit paru, sebagaimana ditegaskan dalam WHO *Global Air Quality Guidelines* 2021 yang menetapkan nilai ambang batas tahunan PM2.5 sebesar 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk melindungi kesehatan masyarakat (Sekhavati, E. Yengejeh, 2023; World Health Organization, 2021).

Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian emisi karbon pada pekerjaan *earthwork* tidak hanya relevan untuk mitigasi perubahan iklim, tetapi juga merupakan bagian integral dari manajemen risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Oleh karena itu, strategi seperti penggunaan bahan bakar rendah sulfur, penjadwalan kerja untuk mengurangi paparan puncak, pembasahan area kerja, serta penyediaan APD *respirator* perlu diintegrasikan dalam Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK) proyek *earthwork* di Indonesia.

Integrasi ini mengubah paradigma dari sekadar upaya kelestarian lingkungan menjadi mandat K3 yang tidak dapat ditawar, di mana mitigasi di sumbernya melalui pengendalian teknis menjadi perlindungan kesehatan jangka panjang bagi pekerja. Integrasi mitigasi emisi ke dalam sistem manajemen K3 sejalan dengan prinsip ILO-OSH 2001 yang menekankan pencegahan risiko di sumbernya melalui pengendalian teknis dan administratif (International Labour Organization, 2022).

Analisis Komparatif Antar Penelitian

Analisis komparatif terhadap 13 artikel primer mengungkapkan disparitas signifikan dalam hal cakupan metodologis dan kedalaman analisis. Studi yang menggunakan batasan sistem *cradle-to-gate* atau *cradle-to-grave*, seperti Pratama & Wijaya (2024) dan Agustiningtyas et al. (2025), cenderung menghasilkan estimasi emisi yang lebih komprehensif karena mencakup rantai pasok material dari hulu hingga hilir. Sebaliknya, studi berbasis *gate-to-gate*,

meskipun lebih praktis dalam implementasinya, menghasilkan estimasi yang terpotong dan berpotensi meremehkan total beban lingkungan.

Dari sisi instrumen kalkulasi, terdapat gradasi kematangan yang jelas: studi awal (2020-2022) masih dominan menggunakan spreadsheet manual seperti Microsoft Excel (Fistcar, 2020), sementara studi terbaru (2024-2026) telah mengadopsi *OpenLCA* dan integrasi BIM-LCA (Kusuma et al., 2025). Disparitas ini menunjukkan lintasan kemajuan metodologis yang positif, namun juga mengindikasikan ketidakseragaman standar analisis yang berpotensi mengurangi komparabilitas hasil antar studi.

Hubungan Kausal Emisi Karbon dan Kesehatan Pekerja Konstruksi

Hubungan antara emisi karbon dari aktivitas *earthwork* dan dampak kesehatan pekerja konstruksi bersifat kausal dan berjenjang. Pembakaran bahan bakar diesel oleh alat berat tidak hanya menghasilkan CO₂ sebagai gas rumah kaca, tetapi secara simultan melepaskan polutan udara berbahaya berupa PM_{2.5}, NO_x, CO, dan hidrokarbon yang secara langsung berdampak pada kesehatan pernapasan pekerja di area proyek (Sekhavati, E. Yengejeh, 2023).

Paparan kronis terhadap PM_{2.5} pada konsentrasi di atas ambang batas WHO sebesar 5 µg/m³ (World Health Organization, 2021) terbukti meningkatkan risiko penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), asma okupasional, dan gangguan kardiovaskular pada populasi pekerja konstruksi. Kondisi ini diperparah oleh karakteristik pekerjaan *earthwork* yang berlangsung di ruang terbuka dengan paparan langsung terhadap debu fugitif dan gas buang mesin dalam durasi shift kerja yang panjang. Oleh karena itu, setiap upaya mitigasi emisi karbon pada *earthwork* secara inheren juga merupakan intervensi perlindungan kesehatan kerja.

Model Konseptual Integrasi LCA-K3

Berdasarkan sintesis temuan, penelitian ini mengajukan model konseptual integrasi *Life Cycle Assessment* dengan sistem manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang terdiri atas tiga komponen utama. Komponen pertama adalah penilaian emisi berbasis LCA pada fase *earthwork*, yang mengkuantifikasi beban lingkungan dan mengidentifikasi *hotspot* emisi menggunakan perangkat lunak profesional seperti *OpenLCA* dengan basis data inventori yang tervalidasi. Komponen kedua adalah translasi

hasil LCA ke dalam parameter risiko K3, di mana profil emisi gas buang alat berat dikonversikan menjadi indeks paparan okupasional untuk dibandingkan dengan nilai ambang batas yang ditetapkan WHO dan regulasi nasional.

Komponen ketiga adalah formulasi strategi mitigasi bersama (co-benefit mitigation), yang mencakup pengendalian teknis di sumbernya melalui penggunaan bahan bakar rendah sulfur, optimalisasi penjadwalan operasional alat berat untuk mereduksi *idle time*, implementasi sistem *fleet management* berbasis telematika, serta penyediaan alat pelindung diri berupa respirator bersertifikasi bagi pekerja. Model integrasi ini sejalan dengan prinsip pencegahan risiko di sumbernya sebagaimana diamanatkan dalam pedoman ILO-OSH 2001 (International Labour Organization, 2022).

Rekomendasi Kebijakan Dekarbonisasi Konstruksi

Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa rekomendasi kebijakan strategis dapat dirumuskan untuk mempercepat dekarbonisasi sektor konstruksi di Indonesia. Pertama, pemerintah melalui Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat perlu memprioritaskan pengembangan *National LCI Database* yang mencakup faktor emisi spesifik untuk aktivitas *earthwork* di Indonesia, meliputi data konsumsi bahan bakar riil alat berat berdasarkan jenis tanah, kondisi topografi, dan iklim lokal. Kedua, regulasi Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK) perlu diperluas cakupannya untuk mengintegrasikan parameter emisi karbon sebagai indikator kinerja lingkungan proyek yang wajib dipantau dan dilaporkan.

Ketiga, insentif fiskal berupa keringanan pajak atau kemudahan perizinan perlu diberikan kepada kontraktor yang mengadopsi teknologi konstruksi rendah karbon, termasuk penggunaan alat berat berbahan bakar alternatif dan sistem manajemen armada digital. Keempat, standar kompetensi tenaga kerja konstruksi perlu diperbarui untuk mencakup literasi lingkungan dan pemahaman mengenai dampak emisi terhadap kesehatan kerja.

KESIMPULAN

Kajian sistematis terhadap 13 artikel primer domestik periode 2020–2026 menunjukkan bahwa riset LCA konstruksi di Indonesia masih didominasi batasan sistem gate-to-gate akibat ketiadaan *National LCI Database*, sehingga mayoritas studi bergantung pada faktor emisi luar negeri seperti Ecoinvent yang kurang merepresentasikan kondisi operasional lokal.

Pekerjaan earthwork teridentifikasi sebagai hotspot emisi utama, dipicu oleh operasional alat berat diesel dan inefisiensi idle time, yang secara simultan meningkatkan risiko paparan polutan udara (PM2.5, NOx) bagi pekerja di lapangan.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini merekomendasikan akselerasi pengembangan basis data inventori emisi nasional, integrasi parameter emisi karbon ke dalam regulasi Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK), serta pemberian insentif bagi adopsi teknologi konstruksi rendah karbon. Penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi integrasi tripartit Building Information Modeling, LCA, dan sistem manajemen K3 secara empiris di lapangan guna mendukung pencapaian target dekarbonisasi Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulloh, M. N., Yuniarto, A., Ramadhan, I., & Budiono, D. I. L. (2026). *Dampak : Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas Penggunaan Life Cycle Assessment (Lca) Sebagai Metode Identifikasi Dampak Lingkungan Pada Environmental Management System (Ems) Di Industri Eksplorasi Minyak Dan Gas Pt X. I*, 68–78.
- Agustiningtyas, R. S., Takaguchi, H., Kubota, T., Nur, M., Alfata, F., & Surahman, U. (2025). Comparative Analysis Of Life Cycle Inventory Of Cement And Ready - Mix Concrete Production In Indonesia. *Journal Of Material Cycles And Waste Management*, 27(1), 488–502. <https://doi.org/10.1007/S10163-024-02135-X>
- Allo, P. S., Patalo, S., & Tangdialla, R. (2026). Analisis Life Cycle Assessment (Lca) Pada Beton Ramah Lingkungan Dengan Pemanfaatan Limbah Plastik Pet Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Paulus Civil Engineering Journal*, 8(1), 45–53.
- Arduin, D. C., Laldas, L. R., Lima, R. C. A. De, & Paiva, R. L. M. (2022). Life Cycle Assessment (Lca) In Earth Construction: A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. *Sustainability*, 14(3), 1353. <https://doi.org/10.3390/Su14031353>
- Fistcar, W. A. (2020). *Implementasi Life Cycle Assessment (Lca) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku Dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan - Samarinda*. 18, 307–314.
- Hong, B. (2022). Assessment Of Emissions And Energy Consumption For Construction Machinery In Earthwork Activities By Incorporating Real-World Measurement And Discrete-Event Simulation. *Journal Of Cleaner Production*, 338, 130590. <https://doi.org/10.1016/J.Jclepro.2022.130590>
- Indah, R. N., & Widyaningsih, Y. (2025). *Praktik Konstruksi Berkelanjutan Di Indonesia : Kajian Literatur Komprehensif Abstract . Sustainable*

- Construction Practice In Indonesia : A Comprehensive*. 21(April), 48–67.
<https://doi.org/10.28932/jts.v21i1.7498>
- International Labour Organization. (2022). *Guidelines On Occupational Safety And Health Management Systems, Ilo-Osh 2001*.
- International Organization For Standardization. (2006). *Iso 14040:2006 — Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles And Framework*.
- International Organization For Standardization. (2017). *Iso 14044:2006/Amd 1:2017 — Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements And Guidelines*.
- Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. (2023). *Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (Grk) Dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (Mrv) Nasional 2022*.
- Kurnia, A., Handayani, F., & Setyawan, A. (2022). *Konstruksi Jembatan Simpang Susun Rangkasbitung*. 10(3), 203–209.
- Kusuma, M. A., Adelia, A., Asri, P., Utomo, J., & Hatmoko, D. (2025). *Analisis Interoperabilitas Building Information Modeling 4d Dan Life Cycle Assessment Guna Estimasi Co 2 Pekerjaan Struktur Beton Bertulang (Studi Kasus Proyek X Di Kota Semarang)*. November, 6–8.
- Lendra, L., Brita, A., Gawei, P., Sintani, L., Studi, P., Teknik, J., Teknik, F., & Raya, U. P. (2022). *Analisis Konsumsi Energi Dan Emisi Gas Rumah Kaca Lentur Dan Perkerasan Kaku*. 10(3), 201–211.
- Page, M. J., Mckenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Loder, W., Mayo-Wilson, E., Mcdonald, S., Mcguinness, L. A., Stewart, A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., ... Moher, D. (2021). *The Prisma 2020 Statement : An Updated Guideline For Reporting Systematic Reviews*. 1–15.
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>
- Panguriseng, A. F. H., Marleni, N. N., & Ahmad, J. S. M. (2026). *Analisis Jejak Karbon Pada Tahap Konstruksi Menggunakan Pendekatan Ghg Protocol (Studi Kasus : Gedung Kuliah Ftm Upn Veteran Yogyakarta)*. April, 1–11.
- Peginusa, S. S., Sari, D. P., Tendean, C., & Soukotta, D. (2025). *Analisis Efektivitas Penerapan Konstruksi Hijau Pada Proyek Bangunan Berkelanjutan*. 725–732. <https://doi.org/10.33364/Konstruksi/V.23-2.2762>
- Pratama, R. Y., & Wijaya, I. M. (2024). *Analisis Cradle-To-Grave Siklus Hidup Jembatan Beton Di Indonesia Menggunakan Openlca*. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 11(2), 89–101.
- Rakhmawati, A. N., Devia, Y. P., Wijatmiko, I., Java, M. E., & Java, M. E. (2020). *Life Cycle Assessment (Lca) Analysis Of Concrete Slab*

- Construction For Estimating The Environmental Impact*. 14(3).
- Ramadhan, F., & Utomo, S. (2023). Identifikasi Jejak Karbon Aktivitas Earthwork Pada Proyek Jalan Raya Menggunakan Faktor Emisi Ipcc. *Jurnal Infrastruktur Berkelanjutan*, 7(3), 145–156.
- Roi, F., Tampubolon, S., Yuwono, A. S., Halomoan, A., & Achsani, A. (2021). *Penggunaan Bahan Bakar Alternatif Dalam Pengelolaan Tambang Batubara Sebagai Sumber Energi Yang Ramah Terhadap Lingkungan*. 19(1), 89–97. <https://doi.org/10.14710/Jil.19.1.89-97>
- Sekhavati, E. Yengejeh, R. J. (2023). Particulate Matter Exposure In Construction Sites Is Associated With Health Effects In Workers. *Frontiers In Public Health*, 11, 1130620. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1130620>
- Song, X., Carlsson, C., Kiilsgaard, R., Bendz, D., & Kennedy, H. (2020). *Life Cycle Assessment Of Geotechnical Works In Building Construction : A Review And Recommendations*. December 2019.
- Suh, S., & Lippiatt, B. (2022). Framework For The Integration Of Life Cycle Inventory Databases Toward A National Lca Commons. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, 27(1), 15–28.
- World Health Organization. (2021). *Who Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (Pm2.5 And Pm10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide And Carbon Monoxide*.
- 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), 96–107. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/1436%0a%0a>