

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wheel loader merupakan salah satu aset krusial dalam operasi pertambangan dan konstruksi modern, namun juga termasuk kategori peralatan dengan intensitas penggunaan energi tertinggi. Karakteristik konsumsi energinya tidak bersifat statis, melainkan sangat dinamis dan bergantung pada load cycle (siklus kerja) yang terdiri dari fase-fase operasional berbeda: loading (pengisian material), hauling (transportasi), dumping (pembuangan), dan idle (mesin menyala tanpa beban) (Ma et al., 2015). Setiap fase memiliki profil beban mesin yang unik; misalnya, fase loading menuntut torsi tinggi pada kecepatan rendah untuk penetrasi material, sedangkan fase hauling membutuhkan daya tinggi pada kecepatan operasional yang lebih stabil. Studi empiris menunjukkan bahwa distribusi waktu antar fase ini sangat memengaruhi Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), di mana operasi pada beban parsial (<20% load; dominan terjadi saat idle atau manuver ringan) dapat menyumbang hingga 63% dari total waktu operasi namun dengan efisiensi termal yang jauh lebih rendah dibandingkan kondisi beban optimal (California Air Resources Board, 2021).

Wheel loader merupakan alat berat yang memiliki berbagai tipe berdasarkan kapasitas bucket dan aplikasinya. Secara umum, wheel loader diklasifikasikan menjadi small wheel loader (kapasitas < 2 m³), medium wheel loader (kapasitas 2-5 m³), dan large wheel loader (kapasitas > 5 m³). Setiap tipe memiliki karakteristik operasional yang berbeda sesuai dengan aplikasi di lapangan. Dalam operasionalnya, wheel loader bekerja dalam siklus kerja (load cycle) yang terdiri dari empat fase utama: (1) Loading - pengisian material ke bucket, (2) Hauling - pengangkutan material ke lokasi pembuangan, (3) Dumping - pembuangan material, dan (4) Return/Idle - kembali ke posisi awal atau kondisi siaga. Setiap fase memiliki karakteristik konsumsi bahan bakar yang berbeda, dengan fase loading dan hauling umumnya mengonsumsi bahan bakar lebih tinggi dibandingkan fase idle.

Secara kuantitatif, wheel loader kelas menengah (kapasitas 2–3 ton) dapat mengonsumsi bahan bakar diesel antara 15–30 liter per jam, dengan variasi hingga ±40%

tergantung pada jenis material, kondisi medan, dan pola operasi. Namun, angka rata-rata ini menyembunyikan kompleksitas sistem: konsumsi energi tidak hanya fungsi dari volume bahan bakar, tetapi hasil interaksi non-linear antara termodinamika pembakaran, respons transmisi hidrolik, dan strategi kontrol operator (MYZG, 2025; Raygoo, 2025). Penelitian oleh Ma et al. (2015) menunjukkan bahwa bahkan untuk siklus V-type yang terstandarisasi, variasi material (pasir vs. batu keras) dapat mengubah total konsumsi bahan bakar per siklus hingga 3,44% hanya karena perbedaan resistensi penetrasi. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan berbasis "rata-rata" atau faktor emisi statis tidak cukup untuk memodelkan perilaku energi wheel loader secara akurat.

Berbeda dengan sistem steady-state, operasional wheel loader dicirikan oleh siklus kerja yang dinamis (seperti loading, hauling, dumping, dan idle) yang menyebabkan adanya fluktuasi pada beban kerja mesin. Variabilitas tersebut secara teknis menciptakan sebuah tantangan untuk memodelkan hubungan non-linear antara parameter operasional (beban, durasi siklus, RPM) dengan konsumsi energi dan pembentukan emisi, khususnya pada mesin pembakaran internal diesel.

Kondisi medan kerja juga memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja wheel loader. Medan dengan kemiringan tinggi, permukaan yang tidak rata, atau kondisi tanah yang lunak dapat meningkatkan resistensi gulir (rolling resistance) yang pada akhirnya meningkatkan konsumsi bahan bakar. Selain itu, jarak hauling, ketinggian lokasi operasi (altitude), dan kondisi cuaca juga mempengaruhi efisiensi operasional alat. Konsumsi bahan bakar pada wheel loader memiliki korelasi langsung dengan emisi CO₂ yang dihasilkan. Setiap liter bahan bakar diesel yang dibakar menghasilkan emisi CO₂ sebesar 2,68 kg (berdasarkan faktor emisi IPCC). Oleh karena itu, peningkatan efisiensi bahan bakar tidak hanya berdampak pada pengurangan biaya operasional tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca.

Inefisiensi operasional pada wheel loader tidak hanya berdampak pada peningkatan biaya bahan bakar, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, khususnya CO₂ dan NO_x. Studi menunjukkan bahwa variasi beban dan durasi siklus kerja dapat mengubah Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) hingga 40%, yang secara langsung memengaruhi laju pembentukan emisi (Mohd Tamam et al., 2023). Tantangan utamanya terletak pada kompleksitas sistem: konsumsi energi dan emisi tidak semata-mata fungsi dari

volume bahan bakar yang dikonsumsi, melainkan hasil interaksi dinamis antara termodinamika pembakaran, respons mesin dalam kondisi transient, dan strategi operasi (Awang et al., 2021). Pada kondisi beban parsial ($<20\%$ engine load) yang mendominasi fase idle atau manuver ringan, efisiensi konversi energi termal (Brake Thermal Efficiency/BTE) menurun drastis akibat rasio udara-bahan bakar yang tidak optimal dan peningkatan kehilangan panas (heat loss) per siklus, sehingga BSFC meningkat meskipun output kerja rendah. Sebaliknya, pada fase loading yang menuntut torsi tinggi, keterlambatan respons sistem induksi (turbo lag) menyebabkan pembakaran tidak sempurna, meningkatkan emisi CO dan partikulat, sementara temperatur puncak silinder yang melampaui 1.800 K memicu pembentukan NO_x melalui mekanisme Zeldovich.

Kemudian, perilaku mesin dalam kondisi non-steady-state, di mana beban, putaran, dan laju injeksi bahan bakar berubah secara cepat dalam hitungan detik dapat menghasilkan fluktuasi efisiensi termal yang tidak dapat diprediksi oleh model berbasis faktor emisi statis (Kanterakis et al., 2021). Strategi operasi seperti pengurangan durasi idle, optimasi distribusi beban pada siklus kerja, dan penyesuaian fuel injection timing secara adaptif terbukti mampu menurunkan BSFC rata-rata hingga 8,7% dan mengurangi emisi NO_x secara simultan melalui kontrol temperatur pembakaran dan peningkatan atomisasi bahan bakar (Jassim et al., 2019; Subagiyo & Anggoro, 2025; F. Wang et al., 2024). Oleh karena itu, pendekatan evaluasi yang mengabaikan dinamika load cycle dan karakteristik transient mesin akan menghasilkan estimasi emisi yang bias dan tidak merepresentasikan performa sistem secara fisik.

Dominasi metode estimasi emisi alat berat saat ini masih bertumpu pada pendekatan berbasis inventarisasi statis dan pemodelan makro-ekonomi yang mengabaikan dinamika operasional mikro. Pendekatan top-down seperti IPCC Tier 2 dan Vehicle Kilometers Traveled (VKT) secara luas digunakan untuk proyeksi emisi kendaraan berat di tingkat kota maupun nasional (Budihardjo et al., 2021). Metode ini mengandalkan faktor emisi (EF) konstan (misalnya, 2,2 kg CO₂/liter solar) yang dikalikan dengan konsumsi bahan bakar, sehingga menghasilkan estimasi yang cepat untuk pelaporan kebijakan namun gagal menangkap variabilitas termodinamika mesin selama kondisi transien (Abdul Latif et al., 2021). Di sisi lain, perkembangan machine learning telah meningkatkan akurasi prediksi emisi di tingkat makro. Studi terbaru menggunakan Support Vector Regression (SVR) dengan Sequential Squeeze Feature Selection (SSFS) mencapai akurasi rata-rata 96,21% untuk proyeksi CO₂

nasional dengan variabel eksogen seperti GDP, konsumsi energi, dan industri (Begum & Mobin, 2025). Pendekatan ekonometrika panel juga mengonfirmasi bahwa pertumbuhan ekonomi dan penggunaan energi non-terbarukan secara signifikan mendorong emisi berbasis konsumsi, sementara globalisasi dan energi terbarukan berfungsi sebagai faktor mitigasi (Adebayo et al., 2022). Namun, kedua tren metodologis ini bersifat agregat: mereka dirancang untuk kebijakan energi nasional atau regional, bukan untuk memodelkan respons emisi terhadap variasi beban, durasi siklus, atau perilaku mesin pada peralatan individual seperti wheel loader. Akibatnya, model ini tidak dapat menjawab pertanyaan operasional kritis seperti "bagaimana perubahan durasi fase idle atau intensitas loading memengaruhi BSFC dan pembentukan NOx secara real-time?"

Pada level mikro, literatur teknik mesin telah membuktikan bahwa konsumsi energi dan emisi bersifat non-linear terhadap beban dan kecepatan mesin, namun studi ini masih bersifat eksperimental-deskriptif. Pengujian emulsi B30 biodiesel-diesel dengan sistem RTEs menunjukkan bahwa Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) dapat turun hingga 8,70% pada beban rendah, sementara emisi NOx dan smoke opacity turun signifikan pada beban tinggi (64 kW) akibat efek micro-explosion dan pendinginan muatan (Mohd Tamam et al., 2023). Demikian pula, studi campuran Waste Plastic Oil (WPO) dan biodiesel kelapa sawit mengonfirmasi bahwa Brake Thermal Efficiency (BTE) dan BSFC berfluktuasi secara tajam tergantung pada rasio komposisi bahan bakar dan rentang RPM (900–2400 rpm), dengan penurunan efisiensi pada rantai asam lemak panjang yang menghambat penguapan sempurna (Awang et al., 2021). Temuan ini secara empiris membuktikan bahwa emisi tidak dapat direduksi menjadi fungsi linier dari volume BBM, melainkan hasil interaksi kompleks antara rasio udara-bahan bakar, temperatur pembakaran, dan pola beban. Paralel dengan hal tersebut, strategi optimasi energi di tingkat fasilitas industri telah maju pesat. Implementasi Energy Management System (EnMS) berbasis ISO 50001 dilaporkan meningkatkan kinerja energi hingga 37,5% dan mengurangi biaya operasional secara signifikan melalui audit berkelanjutan (Prasetya et al., 2021).

Integrasi sistem hibrida Solar PV + Battery Energy Storage System (BESS) + Demand Response (DR) untuk peak shaving di bangunan industri berhasil menurunkan biaya energi sebesar 6,9% dan emisi CO₂ sebesar 8,6% melalui penjadwalan pengisian/pengosongan baterai yang responsif (Zahari et al., 2024). Namun, studi-studi optimasi ini berfokus pada beban

bangunan yang relatif stabil atau grid-level management, dan belum diterjemahkan ke dalam kerangka kerja yang menangkap sifat siklik (duty cycle) dan inersia termal pada alat berat bergerak. Lebih lanjut, studi pada industri berat di ekonomi berkembang mengungkap bahwa adopsi teknologi mitigasi sering terhambat oleh short-termism, keterbatasan modal, dan kompleksitas integrasi teknis, sehingga perusahaan cenderung memilih penyesuaian operasional murah alih-alih investasi pada sistem prediktif berbasis data (Panjaitan et al., 2023).

Di Indonesia, komitmen pemerintah untuk mencapai target penurunan emisi sebesar 29% pada tahun 2030 semakin menuntut industri untuk memprioritaskan efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon. Komitmen ini tertuang dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang menjadi bagian dari Perjanjian Paris (The Republic Of Indonesia, 2021). Upaya tersebut mencakup berbagai sektor, termasuk energi, transportasi, dan industri, yang merupakan penyumbang utama emisi karbon. Untuk mewujudkan target tersebut, pemerintah telah meluncurkan sejumlah instrumen kebijakan strategis, termasuk penerapan nilai ekonomi karbon melalui mekanisme perdagangan emisi dan pajak karbon, serta integrasi prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG) dalam pelaporan korporasi. Di tingkat operasional, adopsi sistem manajemen energi berbasis ISO 50001 telah terbukti mampu menurunkan konsumsi energi dan emisi CO₂ secara terstruktur, dengan payback period yang bervariasi antara beberapa bulan hingga tiga tahun tergantung pada sektor dan skala implementasi (Prasetya et al., 2021). Sejalan dengan itu, strategi demand-side management seperti peak shaving dan integrasi sistem penyimpanan energi mulai diujicobakan pada fasilitas industri untuk mengoptimalkan profil beban listrik dan mengurangi jejak karbon operasional tanpa mengganggu kontinuitas produksi (Zahari et al., 2024).

Namun, implementasi kerangka kebijakan tersebut di negara berkembang seperti Indonesia masih menghadapi hambatan struktural yang signifikan. Studi empiris pada industri berat di Indonesia mengidentifikasi bahwa prioritas investasi perusahaan masih sangat didominasi oleh pertimbangan efisiensi biaya jangka pendek (short-termism), sementara ketersediaan modal, kompleksitas teknis integrasi, dan ketiadaan kerangka kebijakan lingkungan yang stabil menjadi penghambat utama adopsi teknologi dekarbonisasi (Panjaitan et al., 2023). Analisis kebijakan sektor ketenagalistrikan juga menunjukkan bahwa dampak pengurangan emisi spesifik dari perubahan kebijakan energi baru umumnya baru terlihat secara

nyata setelah jeda waktu sekitar satu dekade, mengindikasikan bahwa transisi rendah karbon bersifat gradual dan memerlukan intervensi yang terukur serta berbasis data operasional aktual (Abdul Latif et al., 2021). Dalam konteks alat berat, khususnya wheel loader, tantangan ini menjadi lebih akut karena operasinya yang bersifat dinamis, siklik, dan sangat bergantung pada variasi beban, durasi idle, serta perilaku operator. Sebagian besar pendekatan estimasi emisi di Indonesia masih mengandalkan metode inventarisasi statis berbasis Vehicle Kilometers Traveled (VKT) atau faktor emisi konversi sederhana yang tidak mampu menangkap variabilitas termodinamika mesin selama kondisi transien (Budihardjo et al., 2021). Tanpa model prediktif yang secara eksplisit mengintegrasikan load cycle dengan parameter operasional nyata, kebijakan efisiensi energi cenderung bersifat reaktif, tidak dapat menjawab skenario what-if, dan gagal menghasilkan rekomendasi optimasi yang aplikatif di tingkat peralatan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi energi pada operasional *wheel loader* dengan pendekatan pengukuran emisi karbon, sehingga dapat memberikan rekomendasi untuk optimalisasi operasional alat berat. Optimalisasi ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi biaya operasional tetapi juga mendukung pencapaian target keberlanjutan lingkungan yang menjadi perhatian global. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi energi operasional *wheel loader* melalui pendekatan pengukuran emisi karbon sebagai indikator kinerja energi, sehingga hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan operasional yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan. Evaluasi kinerja wheel loader dalam penelitian ini dilihat dari beberapa parameter utama: (1) Produktivitas (m^3/jam), (2) Konsumsi bahan bakar spesifik (liter/jam atau liter/m^3), (3) Efisiensi termal brake (BTE), (4) Emisi CO_2 (kg/jam atau kg/m^3), dan (5) Utilisasi alat ($\text{jam operasi efektif}/\text{jam tersedia}$).

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana kinerja operasional wheel loader ditinjau dari produktivitas dan konsumsi bahan bakar pada kondisi medan kerja yang berbeda?
2. Bagaimana estimasi emisi CO_2 yang dihasilkan dari operasional wheel loader berdasarkan konsumsi bahan bakar aktual?

3. Faktor-faktor operasional apa saja yang mempengaruhi efisiensi dan inefisiensi penggunaan bahan bakar pada wheel loader?
4. Bagaimana model matematis yang dapat digunakan untuk memprediksi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ berdasarkan parameter operasional wheel loader?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kinerja operasional wheel loader berdasarkan parameter produktivitas, konsumsi bahan bakar, dan utilisasi alat.
2. Mengestimasi emisi CO₂ yang dihasilkan dari operasional wheel loader menggunakan metode IPCC Tier 2 dengan faktor emisi 2,68 kg CO₂/liter solar.
3. Mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan efisiensi dan inefisiensi konsumsi bahan bakar pada wheel loader.
4. Mengembangkan model matematis prediksi konsumsi bahan bakar berdasarkan persamaan:

$$FC = f(L, D, T, M)$$

dimana:

FC = Fuel Consumption (liter/jam)

L = Load factor

D = Distance hauling (m)

T = Cycle time (menit)

M = Medan kerja factor

Model ini mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Caterpillar Performance Handbook (2020) dan disesuaikan dengan kondisi operasional di Indonesia.

5. Memberikan rekomendasi strategi optimasi operasional untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi CO₂.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini memberikan manfaat teoritis sebagai berikut:

- a. Memperkaya kajian efisiensi energi pada alat berat, khususnya wheel loader, dengan mengintegrasikan pendekatan pengukuran emisi karbon sebagai indikator kinerja energi operasional.
- b. Memberikan kerangka konseptual hubungan antara konsumsi energi, output kerja, dan intensitas emisi karbon, sehingga efisiensi energi tidak hanya dipahami dari sisi teknis konsumsi bahan bakar, tetapi juga dari dampak lingkungan yang ditimbulkan.
- c. Mengembangkan indikator evaluasi efisiensi energi berbasis emisi karbon yang dapat digunakan sebagai referensi dalam penelitian-penelitian lanjutan di bidang energi, alat berat, dan keberlanjutan industri.
- d. Menjadi dasar pengembangan model evaluasi kinerja energi operasional pada sistem mesin berbahan bakar fosil yang sejenis, khususnya pada sektor pertambangan dan konstruksi.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini memberikan manfaat praktis sebagai berikut:

- a. Sebagai alat evaluasi kinerja operasional *wheel loader*, khususnya dalam mengidentifikasi tingkat efisiensi energi dan besaran emisi karbon yang dihasilkan selama operasi aktual.
- b. Membantu perusahaan dalam mengidentifikasi sumber inefisiensi energi, seperti tingginya konsumsi bahan bakar, waktu idle yang berlebihan, dan pola operasi yang tidak optimal.
- c. Menjadi dasar penyusunan rekomendasi operasional berbasis data energi dan emisi, yang dapat diterapkan untuk menurunkan konsumsi bahan bakar dan intensitas emisi karbon.
- d. Mendukung peningkatan efisiensi biaya operasional perusahaan, melalui optimalisasi penggunaan energi dan perpanjangan umur pakai alat berat.
- e. Menjadi referensi bagi manajemen energi dan pengelolaan emisi karbon di tingkat perusahaan, sejalan dengan penerapan sistem manajemen energi dan target keberlanjutan lingkungan.
- f. Sebagai referensi metodologi validasi hasil penelitian emisi dan konsumsi bahan bakar alat berat untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup dan batasan penelitian ditentukan sebagai berikut:

1. Objek penelitian terbatas pada satu unit wheel loader tipe Caterpillar (BD-1720, BD-1717, BD-1718, WL-3513, WL-3514, WL-3512, WL-3516) dengan kapasitas bucket [3,0 m³ yang beroperasi di lokasi Interport Mandiri Utama, Kalimantan Selatan.
2. Analisis dibatasi pada siklus kerja standar (V-cycle: loading, hauling, dumping, idle) dengan kondisi medan kerja datar hingga bergelombang ringan (<5%) dan tidak mencakup kondisi ekstrem (hujan lebat, kemiringan >15%).
3. Emisi CO² dihitung berdasarkan konsumsi bahan bakar aktual menggunakan faktor emisi IPCC Tier 1 sebesar 2,68 kg CO₂/liter diesel, sedangkan NO dimodelkan secara physics-based berbasis parameter operasional. Emisi tidak langsung (well-to-tank) tidak diperhitungkan.
4. Periode pengamatan dilakukan selama 30 hari kerja dengan akumulasi ±650 jam operasi pada shift operasional normal, tanpa intervensi pemeliharaan mayor.
5. Model prediksi dan optimasi dikembangkan berdasarkan data telematika on-board dan validasi lapangan, dengan target akurasi model (RMSE/MAPE) di bawah 10%.
6. Kondisi lingkungan dan faktor eksternal seperti cuaca, variasi operator, dan kondisi material diasumsikan relatif konstan selama periode pengambilan data, sehingga tidak dianalisis sebagai variabel utama penelitian.

1.6 Orisinalitas Penelitian

Tabel 1.1 Penelitian terdahulu

No	Peneliti (Tahun)	Judul	Gap Penelitian
1	Beichuan Hong & Lin Lü (2022)	<i>Assessment of Emissions and Energy Consumption for Construction Machinery in Earthwork Activities by Incorporating Real-World Measurement and Discrete-Event Simulation</i>	Fokus pada beragam mesin konstruksi (termasuk wheel loader) dalam konteks earthwork; namun belum mengkhususkan evaluasi efisiensi energi wheel loader berdasarkan output kerja secara kuantitatif dan belum memfokuskan intensitas emisi karbon sebagai indikator utama efisiensi energi.
2	Yudhistira Arga Dahana (2025)	Analisis Efisiensi Operasional dan Perawatan Wheel Loader dalam Konstruksi dan Pertambangan	Membahas efisiensi operasional dan perawatan, tetapi belum terintegrasi dengan ukuran energi (energi per output kerja) dan emisi karbon sebagai parameter evaluasi efisiensi energi.

No	Peneliti (Tahun)	Judul	Gap Penelitian
3	Muhammad Izhar Alamsyah et al. (2023)	Analisis Konsumsi Bahan Bakar Alat Muat dan Angkut pada Pengupasan Overburden	Fokus pada konsumsi bahan bakar, belum menghubungkan konsumsi energi tersebut dengan efisiensi energi berdasarkan output kerja maupun emisi karbon.
4	Roland Fatar Fernados Sirait et al. (2025)	Analisis Konsumsi Bahan Bakar Alat Gali Muat-Angkut pada Kegiatan Pengupasan Overburden PIT Seloklai	Studi konsumsi bahan bakar per jam, tetapi belum fokus pada indikator efisiensi energi yang mempertimbangkan output kerja dan intensitas emisi karbon.
5	Hendra Rujiadi Adha et al. (2021)	Analisis Konsumsi Bahan Bakar Alat Angkut UD Quester CWE 370 dalam Kegiatan Pengangkutan Bijih Nikel	Fokus pada konsumsi bahan bakar alat angkut dan pengaruh kondisi jalan; masih tidak mengintegrasikan efisiensi energi dikaitkan dengan output kerja dan emisi karbon.
6	(Padovani et al., 2024)	<i>Challenges and solutions for designing Energy-Efficient and Low-Pollutant Machines in Off-Road hydraulics</i>	Penelitian ini tidak secara langsung mengukur emisi karbon atau mengkaji operasi dalam konteks pengukuran emisi pada tingkat operasional sehari-hari alat berat. Sebaliknya, penelitian ini akan lebih fokus pada pengukuran emisi karbon dari operasi sehari-hari wheel loader serta analisis efisiensi energi berdasarkan emisi yang dihasilkan selama operasional.
7	(Holian & Pyeon, 2017)	<i>Analyzing the Potential of Hybrid and Electric Off-Road Equipment in Reducing Carbon Emissions from Construction Industries</i>	Penelitian ini membahas kebijakan dan adopsi teknologi hijau, namun tidak mendalami secara spesifik pengukuran langsung emisi karbon yang dihasilkan selama operasional alat berat tertentu, seperti <i>wheel loader</i> . Sementara itu, penelitian ini akan lebih fokus pada pengukuran emisi karbon yang dihasilkan oleh operasi sehari-hari alat berat dan hubungannya dengan efisiensi energi.
8	(Aoshima et al., 2021)	<i>Simulation-Based Optimization of High-Performance Wheel Loading</i>	Meskipun menggunakan simulasi untuk mengoptimalkan konsumsi bahan bakar, penelitian ini tidak secara eksplisit menilai emisi karbon. Penelitian ini akan menggabungkan aspek tersebut dengan

No	Peneliti (Tahun)	Judul	Gap Penelitian
			melakukan pengukuran langsung emisi karbon selama operasional <i>wheel loader</i> , memberikan pendekatan yang lebih holistik untuk efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon dalam konteks operasional nyata.

Perbedaan utama penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah bahwa penelitian ini akan mengintegrasikan pengukuran emisi karbon sebagai salah satu indikator utama dalam evaluasi efisiensi energi, yang tidak dibahas secara spesifik dalam ketiga penelitian yang disebutkan.



