

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Operasional Wheel Loader dan Load Cycle Modeling

Wheel loader merupakan salah satu jenis alat berat yang digunakan secara luas pada sektor pertambangan dan konstruksi, khususnya untuk kegiatan pemuatan material lepas, pemindahan jarak pendek, serta penataan material. Alat ini dilengkapi dengan *bucket* di bagian depan yang berfungsi untuk mengambil dan memindahkan material seperti tanah, pasir, batuan, maupun material hasil penambangan (Chen et al., 2023).



Gambar 2. 1 Alat Berat Wheel loader

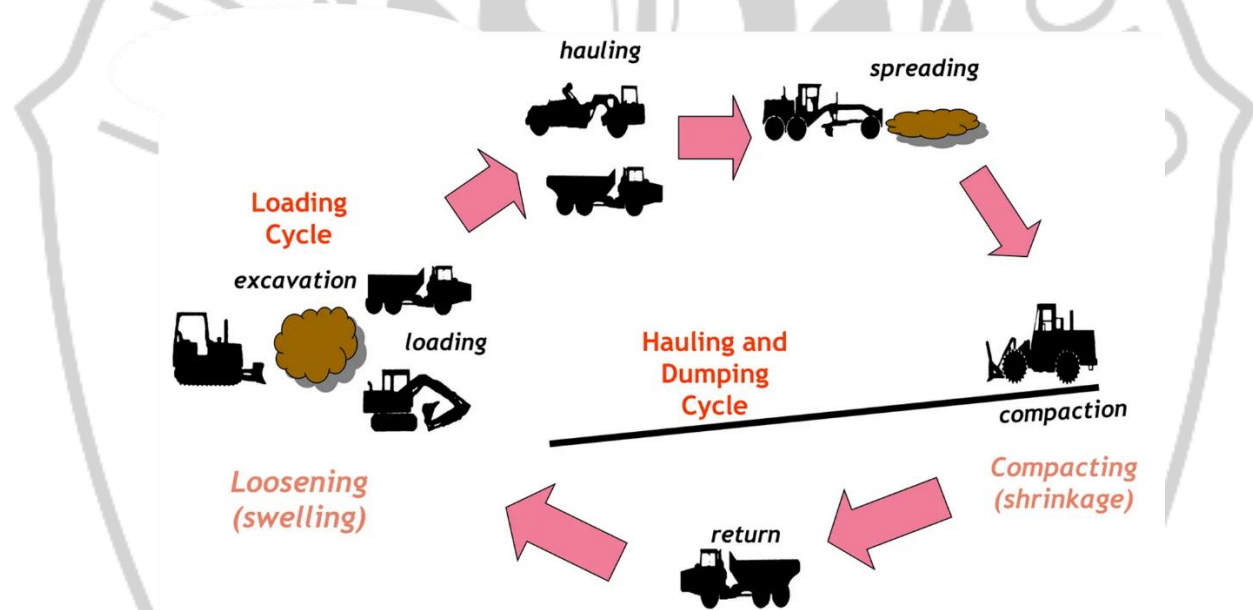
Dalam kegiatan operasional, *wheel loader* umumnya digerakkan oleh mesin diesel berdaya besar yang dirancang untuk menghasilkan torsi tinggi pada putaran rendah hingga menengah. Karakteristik ini memungkinkan *wheel loader* bekerja pada kondisi beban berat dan siklus kerja berulang. Namun demikian, penggunaan mesin diesel dengan daya besar juga menyebabkan konsumsi energi yang relatif tinggi serta kontribusi emisi karbon yang signifikan selama operasi berlangsung. Oleh karena itu, *wheel loader* menjadi salah satu objek kajian yang penting dalam evaluasi efisiensi energi pada sektor alat berat, terutama pada kegiatan operasional yang berlangsung secara kontinu dan intensif (Fei et al., 2025).

Efisiensi energi dalam operasional alat berat seperti *wheel loader* adalah komponen penting untuk mencapai keberlanjutan dalam industri berat. Melalui penerapan prinsip termodinamika,

teknologi canggih, pelatihan operator, dan perawatan yang tepat, efisiensi energi dapat meningkat secara signifikan. Dampaknya tidak hanya dirasakan dalam penghematan biaya operasional, tetapi juga dalam pengurangan emisi karbon yang mendukung tujuan keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, efisiensi energi berperan sebagai faktor kunci dalam optimasi kinerja alat berat dan pencapaian tujuan ekonomi dan lingkungan yang berkelanjutan.

2.1.1 Siklus Kerja Wheel Loader (Loading, Hauling, Dumping, Idle)

Karakteristik operasional *wheel loader* ditentukan oleh pola kerja siklik yang berulang selama proses pemuatan material. Secara umum, siklus kerja *wheel loader* terdiri atas beberapa tahapan utama, yaitu pengambilan material (*loading*), pergerakan menuju lokasi pembuangan (*hauling*), pembuangan material (*dumping*), dan kembali ke posisi awal (*return*). Selain itu, terdapat waktu tidak produktif atau waktu tunggu (*idle time*) yang juga memengaruhi kinerja operasional secara keseluruhan (Coal et al., 2024; Fei et al., 2025).



Gambar 2. 2 Siklus Operasional Wheel Loader

2.1.2 Duty Cycle Modeling dan Variabilitas Operasional

Karakteristik siklus kerja yang dinamis tersebut menjadikan *wheel loader* sebagai sistem operasional yang kompleks dari sudut pandang energi, sehingga evaluasi efisiensi energi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan konsumsi bahan bakar total, tetapi harus mempertimbangkan hubungan antara energi yang digunakan dan output kerja yang dihasilkan. Konsumsi energi pada operasional *wheel loader* dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional, baik yang bersifat teknis

maupun non-teknis. Faktor teknis meliputi kapasitas bucket, daya mesin, kondisi mekanis alat, serta efisiensi sistem transmisi. Sementara itu, faktor non-teknis mencakup kondisi material yang ditangani, jarak pemindahan material, kondisi medan kerja, serta keterampilan dan pola operasi operator (Zauner et al., 2020).

2.1.3 Pengaruh Load Cycle terhadap Konsumsi Energi

Setiap tahapan dalam siklus kerja tersebut membutuhkan energi dalam jumlah yang berbeda-beda. Proses *loading* dan *hauling* umumnya membutuhkan energi paling besar karena melibatkan kerja mesin pada kondisi beban tinggi, sedangkan proses *return* dan *idle time* tetap mengonsumsi energi meskipun tidak menghasilkan output kerja secara langsung. Kondisi ini menyebabkan terjadinya kehilangan energi (*energy losses*) yang berdampak pada penurunan efisiensi energi operasional (Coal et al., 2024).

2.2 Engine Performance dan Energy Modeling

Efisiensi energi adalah konsep yang fundamental dalam berbagai sektor industri, termasuk sektor konstruksi, pertambangan, dan manufaktur, di mana penggunaan alat berat sangat dominan. Secara umum, efisiensi energi didefinisikan sebagai kemampuan untuk menghasilkan output kerja yang lebih besar dengan penggunaan energi yang lebih sedikit. Dalam konteks alat berat, seperti *wheel loader*, efisiensi energi menjadi indikator utama untuk menilai kinerja operasional alat tersebut dalam hal konsumsi bahan bakar dan dampak lingkungan.

2.2.1 Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) dan Brake Thermal Efficiency (BTE)

Dua parameter fundamental dalam mengevaluasi efisiensi konversi energi mesin diesel adalah *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) yang mengukur massa bahan bakar yang dikonsumsi per satuan energi mekanik yang dihasilkan (g/kWh) dan *Brake Thermal Efficiency* (BTE) yang merepresentasikan persentase energi kimia bahan bakar yang berhasil dikonversi menjadi kerja mekanik yang berguna (Awang et al., 2021). Hubungan matematis antara keduanya dapat diekspresikan sebagai:

$$\eta_{BTE} = \frac{3600}{BSFC \times CV} \times 100\%$$

di mana CV adalah calorific value bahan bakar (MJ/kg). Penurunan BSFC secara langsung berkorelasi dengan peningkatan BTE, namun hubungan ini bersifat non-linear dan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi mesin

Studi empiris oleh Mohd Tamam et al. (2023) pada mesin diesel turbocharged common-rail menunjukkan bahwa BSFC mencapai nilai minimum (efisiensi maksimum) pada beban 75–100%, sementara pada beban parsial (<25%) terjadi penurunan drastis BTE hingga 15–20 poin persentase. Fenomena ini, yang dikenal sebagai partial load inefficiency, menjadi sangat relevan untuk wheel loader yang secara inheren beroperasi dalam kondisi beban dinamis dengan proporsi waktu idle yang signifikan (dapat mencapai 30–50% dari total siklus kerja).

2.2.2 Engine Behavior pada Kondisi Dinamis

Selain itu, waktu *idle* yang berlebihan juga menjadi salah satu penyumbang utama inefisiensi energi, karena mesin tetap beroperasi dan mengonsumsi bahan bakar tanpa menghasilkan output kerja. Variasi faktor-faktor tersebut menyebabkan tingkat konsumsi energi *wheel loader* pada kondisi operasional aktual dapat berbeda secara signifikan meskipun menggunakan spesifikasi alat yang sama. Dengan demikian, evaluasi efisiensi energi pada operasional *wheel loader* perlu dilakukan pada kondisi lapangan yang nyata (*actual operating conditions*), sehingga hasil analisis dapat merepresentasikan kinerja energi yang sesungguhnya dan relevan untuk perbaikan operasional.

A. Aspek dasar efisiensi energi

Efisiensi energi dapat dihitung dengan **rasio antara energi yang digunakan (input)** dan hasil kerja yang diperoleh (*output*). Dalam operasional alat berat, output biasanya diukur dengan parameter seperti volume material yang dipindahkan atau pekerjaan yang diselesaikan dalam periode tertentu, sedangkan input merujuk pada jumlah bahan bakar atau energi yang digunakan untuk menyelesaikan tugas tersebut. Dengan kata lain, semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan output yang sama, semakin efisien alat berat tersebut dalam penggunaannya.

Formula efisiensi energi :

$$\text{Efisiensi Energi} = \frac{\text{Input Energi}}{\text{Output Kerja}}$$

Sebagai contoh, dalam operasional alat berat, efisiensi energi dihitung dengan membandingkan energi yang digunakan (input) dengan hasil kerja (output), yang sering kali diukur berdasarkan volume material yang dipindahkan atau pekerjaan yang diselesaikan

dalam periode tertentu. Salah satu studi menemukan bahwa penggunaan teknologi hybrid dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30%, berkat stabilisasi kecepatan mesin diesel dan mitigasi beban transien oleh motor listrik. Selain itu, hingga 20% dari energi dapat diperoleh kembali melalui pengereman, yang semakin meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Allam et al., 2024).

B. Prinsip termodinamika dalam efisiensi energi

Dari perspektif **termodinamika**, efisiensi energi dapat dipahami melalui dua hukum dasar yang menggambarkan perilaku energi dalam sistem fisik.

1. Hukum pertama termodinamika (Konservasi energi)

Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan; energi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam konteks alat berat, energi kimia dalam bahan bakar (seperti diesel) diubah menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan alat. Oleh karena itu, penting untuk mengoptimalkan penggunaan bahan bakar agar tidak ada energi yang terbuang dalam proses konversi tersebut. Contohnya penggunaan teknologi pembakaran efisien pada mesin diesel, seperti sistem common rail dan turbocharger, yang bertujuan untuk memaksimalkan konversi energi dari bahan bakar menjadi tenaga gerak, mengurangi pemborosan energi dan emisi yang dihasilkan (Yu Yan, 2007).

2. Hukum kedua termodinamika (Entropi)

Hukum ini menjelaskan bahwa dalam setiap proses konversi energi, sebagian energi akan hilang sebagai panas yang tidak dapat dimanfaatkan untuk melakukan kerja. Entropi, yang mengukur ketidakteraturan atau pemborosan energi, selalu meningkat dalam sistem yang tertutup. Dalam operasional alat berat, ini berarti bahwa meskipun energi dimanfaatkan, selalu ada sejumlah energi yang terbuang dalam bentuk panas. Sebagai contoh, dalam mesin diesel modern pada *wheel loader*, efisiensi konversi energi sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pembakaran yang tidak sempurna, gesekan dalam komponen mekanik, dan pemborosan energi lainnya dalam sistem. Untuk meminimalkan pemborosan ini, teknologi seperti sistem *turbocharger* dan *common rail injection* digunakan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi pemborosan energi. Mesin yang dirancang dengan lebih baik akan mengurangi peningkatan entropi,

meskipun menurut hukum kedua termodinamika, tidak mungkin sepenuhnya menghindari pemborosan energi dalam bentuk panas (Kostic, 2020).

2.2.4 Partial Load Efficiency dan Transient Operation

Seiring dengan perkembangan teknologi, berbagai inovasi telah diterapkan untuk meningkatkan efisiensi energi pada alat berat. Beberapa teknologi yang digunakan di antaranya adalah:

1. Optimalisasi desain mesin

Mesin yang dirancang dengan komponen yang lebih ringan dan lebih tahan lama mengurangi gesekan dan pemborosan energi. Misalnya, **mesin diesel dengan efisiensi pembakaran tinggi** dan **teknologi turbocharged** mampu menghasilkan tenaga lebih besar dengan bahan bakar yang lebih sedikit.

2. Sistem pemantauan dan pengelolaan energi (Delogu et al., 2016).

Dalam konteks operasional alat berat seperti wheel loader, pengelolaan energi yang efisien sangat bergantung pada teknologi pemantauan berbasis digital yang memungkinkan perusahaan untuk mengontrol konsumsi bahan bakar secara lebih akurat. Salah satu inovasi penting dalam hal ini adalah sistem telematika, yang memungkinkan pemantauan real-time terhadap konsumsi bahan bakar dan kinerja mesin. Teknologi ini telah banyak diadopsi di berbagai sektor industri, termasuk konstruksi, di mana pemantauan melalui sensor bahan bakar membantu mengidentifikasi pola konsumsi dan mendeteksi masalah seperti pemborosan energi atau waktu idle yang tinggi. Sebagai contoh, sistem monitoring energi yang berbasis telemetri memungkinkan operator untuk mengurangi waktu idle dan menyesuaikan pengaturan kerja sehingga konsumsi bahan bakar dapat diminimalkan. Selain itu, sistem otomatisasi dapat mengoptimalkan pengaturan kerja dengan model simulasi untuk mengurangi waktu idle dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. (Popescu et al., 2020). Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga membantu dalam pengelolaan dan pengurangan biaya operasional.

3. Teknologi pemulihan energi

Teknologi energy recovery systems, seperti *regenerative braking*, mulai diterapkan pada alat berat untuk meningkatkan efisiensi energi. Pada sistem *regenerative braking*, energi yang biasanya terbuang saat pengereman dapat ditangkap dan dikonversi kembali

menjadi energi yang berguna, seperti untuk mengisi baterai atau menyuplai daya ke sistem lain. Pendekatan ini banyak digunakan dalam kendaraan listrik dan hybrid, dan kini sedang dikembangkan untuk aplikasi alat berat. Contohnya, teknologi ini sedang diterapkan pada sistem transportasi umum seperti kereta bawah tanah London, yang memanfaatkan energi yang terbuang saat pengereman untuk mendukung operasi stasiun. Penerapan sistem serupa pada alat berat, seperti excavator atau wheel loader, memungkinkan mesin untuk menjadi lebih efisien dengan memanfaatkan energi yang terbuang saat pengereman untuk mendukung sistem lainnya atau mengurangi kebutuhan bahan bakar. Penggunaan teknologi ini dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan, meningkatkan kinerja alat berat, serta mengurangi emisi karbon yang dihasilkan (Sadiq, 2021). Dengan kemajuan ini, alat berat menjadi lebih ramah lingkungan dan efisien, sejalan dengan tren teknologi yang mengoptimalkan penggunaan energi dalam berbagai sektor industri.

4. Penggunaan bahan bakar alternatif

Penggunaan bahan bakar alternatif seperti biodiesel, gas alam, atau hidrogen dapat memberikan dampak positif dalam hal efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Peralihan dari bahan bakar fosil ke bahan bakar alternatif ini membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi yang tidak terbarukan sekaligus meningkatkan keberlanjutan dalam sektor industri, termasuk pada alat berat (Fahmi et al., 2022).

Selain faktor teknis, efisiensi energi dalam operasional alat berat juga dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal yang tidak dapat diabaikan:

1. Pelatihan operator

Keahlian operator dalam mengelola alat berat memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi energi. Operator yang terlatih dengan baik dapat menghindari penggunaan energi yang tidak perlu dan memastikan alat beroperasi dalam kondisi optimal (Arman & Dullah, 2021).

2. Perawatan dan pemeliharaan preventif

Alat berat yang tidak terawat dengan baik akan mengalami penurunan kinerja, yang mengakibatkan peningkatan konsumsi energi. Oleh karena itu, perawatan preventif yang rutin dan terjadwal sangat penting untuk menjaga efisiensi energi. Dengan memastikan komponen-komponen alat berat berfungsi dengan baik, perusahaan dapat menghindari

kerugian energi yang disebabkan oleh mesin yang tidak efisien atau rusak (P. Sullivan et al., 2010).

3. Kondisi lingkungan kerja

Faktor lingkungan seperti suhu udara, kelembapan, dan medan kerja juga memengaruhi efisiensi energi. Di daerah yang sangat panas, misalnya, mesin mungkin akan lebih cepat mengalami penurunan efisiensi karena sistem pendingin yang bekerja lebih keras. Memilih lokasi operasi yang tepat dan memastikan mesin beroperasi dalam kondisi lingkungan yang optimal dapat meningkatkan efisiensi energi (B. Wang et al., 2019).

4. Dampak ekonomi dari efisiensi energi

Efisiensi energi tidak hanya bermanfaat dari segi lingkungan, tetapi juga memiliki dampak ekonomi yang signifikan. Dengan mengurangi konsumsi bahan bakar dan memperpanjang umur alat berat, perusahaan dapat menghemat biaya operasional. Dalam jangka panjang, investasi pada teknologi yang meningkatkan efisiensi energi dapat mengurangi biaya perawatan, bahan bakar, dan bahkan biaya penggantian mesin yang lebih cepat (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

2.3 Emission Modeling dan Pembentukan Emisi

Emisi karbon, yang terutama terdiri dari karbon dioksida (CO_2), adalah salah satu kontribusi terbesar terhadap perubahan iklim global. Sumber utama emisi karbon berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti bahan bakar diesel yang digunakan pada alat berat, termasuk *wheel loader* (Osei-Kusi et al., 2024). Oleh karena itu, pemahaman tentang emisi karbon dalam konteks operasional alat berat sangat penting untuk merancang strategi yang dapat mengurangi dampak lingkungan dan mendukung pencapaian tujuan keberlanjutan.

2.3.1 Pendekatan *Fuel-Based* vs *Physics-Based*

Pada operasional alat berat, terutama yang menggunakan mesin diesel, emisi karbon dihasilkan terutama melalui pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran ini mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi mekanik untuk menjalankan mesin, namun pada saat yang sama, menghasilkan emisi CO_2 sebagai produk sampingan (Wright & Lewis, 2022). Sumber utama emisi karbon dalam operasional alat berat:

1. Pembakaran Bahan Bakar Fosil: Pembakaran diesel di mesin internal combustion menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar. Emisi ini terkait langsung dengan jumlah bahan bakar yang digunakan, dan semakin banyak bahan bakar yang dibakar, semakin tinggi emisi karbon yang dihasilkan.
2. *Idle Time* dan Pemborosan Energi: Ketika alat berat beroperasi dalam kondisi idle atau tidak bergerak, mesin tetap mengonsumsi bahan bakar dan menghasilkan emisi karbon meskipun tidak ada pekerjaan yang dilakukan. Waktu *idle* ini merupakan salah satu faktor terbesar dalam pemborosan energi dan emisi yang tidak perlu.
3. Proses Transportasi dan Logistik: Selain penggunaan alat berat di lokasi konstruksi, transportasi alat berat ke lokasi kerja juga berkontribusi pada emisi karbon, terutama ketika alat berat dipindahkan dalam jarak jauh menggunakan truk pengangkut.

2.3.2 Model Emisi CO₂ (berbasis konsumsi bahan bakar)

Pengukuran Emisi Karbon Mengukur emisi karbon dalam operasional alat berat adalah langkah pertama yang penting untuk memahami dampak lingkungan dan mengidentifikasi area yang membutuhkan perbaikan (Hajji & Lewis, 2017). Beberapa pendekatan pengukuran emisi karbon yang umum digunakan adalah:

1. Pengukuran Berdasarkan Konsumsi Bahan Bakar: Cara paling sederhana dan umum untuk mengukur emisi karbon adalah dengan menghitung konsumsi bahan bakar alat berat dan mengkonversinya ke dalam jumlah CO₂ yang dihasilkan. Emisi CO₂ dapat dihitung menggunakan faktor emisi standar berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan. Adapun rumus untuk menghitung emisi CO₂:
$$\text{Emisi CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Konsumsi Bahan Bakar (L)} \times \text{Faktor Emisi CO}_2 \text{ (kg/L)}$$
Faktor emisi CO₂ untuk diesel sekitar 2,68 kg CO₂ per liter bahan bakar yang terbakar. Dengan rumus ini, kita dapat menghitung total emisi karbon berdasarkan jumlah bahan bakar yang digunakan oleh alat berat.
2. Sistem Monitoring Emisi *Real-Time*: Sistem pemantauan emisi berbasis digital (seperti *telematics* atau sistem *on-board diagnostics*) dapat memberikan data emisi secara *real-time*. Sensor yang terpasang pada mesin alat berat memungkinkan pemantauan pembakaran bahan bakar dan emisi CO₂ yang lebih akurat. Dengan

sistem ini, operator dan manajer dapat mengidentifikasi pola konsumsi bahan bakar yang tidak efisien dan mengoptimalkan pengoperasian untuk mengurangi emisi karbon (Akhavian, 2019).

3. Model Simulasi dan Analisis Emisi: Model simulasi dan analisis emisi karbon yang fokus pada pengurangan waktu idle telah menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi operasional alat berat. Penelitian oleh (Akhavian & H. Behzadan, 2013) mengembangkan sistem untuk memantau waktu idle secara real-time, yang dapat mengidentifikasi saat mesin tidak digunakan secara efisien. Dengan mengurangi waktu idle, konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ dapat dikurangi secara signifikan. Simulasi ini memungkinkan perencanaan operasional yang lebih baik untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan.

Emisi karbon yang dihasilkan oleh alat berat memiliki dampak signifikan terhadap perubahan iklim. Karbon dioksida (CO₂) adalah gas rumah kaca utama yang terlibat dalam pemanasan global. Ketika CO₂ dilepaskan ke atmosfer, ia menyumbang pada peningkatan efek rumah kaca, yang mengarah pada peningkatan suhu bumi, perubahan pola cuaca ekstrem, dan gangguan pada ekosistem global (Smith, 2004).

1. Peningkatan Suhu Global: Emisi CO₂ yang tinggi berkontribusi pada pemanasan global, yang mengarah pada perubahan iklim yang ekstrem. Hal ini dapat mempengaruhi musim tanam, pola cuaca, dan sumber daya alam yang bergantung pada suhu yang stabil.
2. Dampak Kesehatan: Meskipun CO₂ tidak beracun langsung pada manusia, emisi karbon dari pembakaran bahan bakar juga sering disertai dengan emisi polutan lain, seperti partikulat halus (PM) dan oksida nitrogen (NO_x), yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Peningkatan polusi udara ini dapat menyebabkan masalah pernapasan dan penyakit jantung.
3. Kerusakan Ekosistem: Peningkatan suhu global yang disebabkan oleh emisi CO₂ dapat merusak habitat alami, mengancam spesies yang sudah terancam punah, dan mengganggu keseimbangan ekosistem yang bergantung pada suhu dan kondisi lingkungan yang stabil.

Mengurangi emisi karbon dalam operasional alat berat bukan hanya berdampak positif bagi lingkungan, tetapi juga dapat mengurangi biaya operasional dan meningkatkan efisiensi energi. Beberapa strategi yang dapat diterapkan untuk mengurangi emisi karbon adalah:

1. Pemanfaatan Bahan Bakar Alternatif: Beralih dari bahan bakar fosil seperti diesel ke bahan bakar yang lebih ramah lingkungan seperti biodiesel, gas alam, atau hidrogen dapat secara signifikan mengurangi emisi karbon (Yudhistira & Wibowo, 2023).
2. Pengurangan *Idle Time* dan Optimasi Waktu Kerja: Mengurangi waktu idle atau waktu ketika alat berat tidak melakukan pekerjaan aktif, dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon yang tidak perlu. Teknologi telematics dan sistem monitoring berbasis digital memungkinkan perusahaan untuk memantau dan mengurangi waktu idle dengan lebih efektif (Studies et al., 2024).
3. Teknologi Pembakaran yang Lebih Efisien: Menggunakan mesin dengan teknologi pembakaran yang lebih efisien, seperti mesin diesel dengan turbocharged atau common rail injection, dapat mengurangi jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan tenaga yang sama, sehingga menurunkan emisi karbon (Sun & Park, 2020).
4. Penggunaan Alat Berat Listrik atau *Hybrid*: Alat berat listrik atau hybrid yang menggabungkan motor listrik dan mesin pembakaran internal dapat menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah. Meskipun biaya awalnya mungkin lebih tinggi, alat berat jenis ini dapat mengurangi emisi dalam jangka panjang dan mendukung tujuan keberlanjutan (Idris et al., 2025; Veza et al., 2023).
5. Perawatan Preventif dan Pengelolaan Energi: Melakukan perawatan preventif pada alat berat secara rutin memastikan mesin bekerja dengan efisien dan tidak menghasilkan emisi berlebih akibat kerusakan komponen. Sistem energi terbarukan dan pengelolaan energi yang lebih baik dapat membantu alat berat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon secara signifikan (Wehbi et al., 2026; Yang et al., 2022).

2.3.3 Model Emisi NOx (berbasis temperatur dan λ)

Pembentukan emisi *Nitrogen Oxides* (NOx) pada mesin diesel alat berat, termasuk *wheel loader*, merupakan fenomena kompleks yang sangat bergantung pada kondisi

termodinamika di dalam ruang bakar. Secara fundamental, pembentukan NO_x termal (*thermal NO_x*) dijelaskan melalui mekanisme Zeldovich yang diperluas (*extended Zeldovich mechanism*). Mekanisme ini menyatakan bahwa laju pembentukan NO_x memiliki hubungan eksponensial dengan temperatur puncak pembakaran (*peak cylinder temperature*). Ketika temperatur di dalam silinder melebihi ambang batas kritis (sekitar 1800 K), nitrogen dan oksigen di udara mulai bereaksi secara signifikan membentuk NO_x (Nnadozie et al., 2025).

Selain temperatur, rasio udara-bahan bakar atau *equivalence ratio* (λ) merupakan variabel penentu utama dalam model emisi NO_x. Pembentukan NO_x mencapai puncaknya pada kondisi campuran yang sedikit *lean* (kurus), yaitu pada kisaran $\lambda \approx 1.1$ hingga 1.2. Pada kondisi ini, tersedia oksigen yang cukup dan temperatur pembakaran yang tinggi. Sebaliknya, jika λ terlalu tinggi (campuran sangat *lean*), temperatur ruang bakar akan turun akibat kelebihan udara yang bertindak sebagai pendingin, sehingga menekan pembentukan NO_x. Jika λ terlalu rendah (kaya bahan bakar), kekurangan oksigen akan membatasi reaksi oksidasi nitrogen (Falai & Misul, 2023).

Dalam konteks operasional *wheel loader*, pemodelan emisi NO_x menjadi tantangan tersendiri karena mesin sering beroperasi pada kondisi transien (*transient operation*) akibat dinamika *load cycle*. Perubahan beban yang tiba-tiba menyebabkan fluktuasi injeksi bahan bakar yang cepat, menciptakan kondisi lokal dengan temperatur tinggi dan nilai λ yang tidak stabil dalam waktu singkat. Oleh karena itu, model emisi NO_x yang akurat untuk alat berat tidak dapat hanya mengandalkan peta emisi *steady-state*, melainkan memerlukan pendekatan *physics-based* atau *data-driven* (seperti *machine learning*) yang mampu memetakan hubungan non-linear antara parameter operasional sesaat (tekanan silinder, temperatur, dan λ) dengan laju pembentukan NO_x (Desouza et al., 2020).

2.3.4 Hubungan Termodinamika Pembakaran dan Emisi

Hubungan antara proses pembakaran dan pembentukan emisi pada mesin diesel dapat dianalisis secara mendalam melalui lensa hukum termodinamika. Berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika (kekekalan energi), energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar harus setara dengan jumlah kerja mekanik yang dihasilkan (*brake work*), panas yang terbuang melalui gas buang dan sistem pendingin, serta energi yang tidak terbakar sempurna. Ketidakefektifan proses pembakaran, yang sering terjadi pada kondisi beban parsial atau

akselerasi mendadak, secara langsung meningkatkan pembentukan emisi karbon monoksida (CO) dan *Hydrocarbon* (HC) yang belum terbakar, yang merepresentasikan hilangnya potensi energi kimia (He et al., 2011).

Lebih jauh lagi, Hukum Kedua Termodinamika (entropi dan eksergi) memberikan penjelasan mengapa pembentukan emisi tidak dapat dihindari sepenuhnya. Proses pembakaran di dalam silinder mesin diesel bersifat sangat ireversibel, yang ditandai dengan generasi entropi yang tinggi. Destruksi eksergi (*exergy destruction*) selama pembakaran berkorelasi langsung dengan inefisiensi termal dan pembentukan polutan.

Dalam praktik rekayasa mesin diesel, terdapat dilema termodinamika klasik yang dikenal sebagai *NO_x-PM (Particulate Matter) trade-off*. Upaya untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi partikulat (soot) umumnya dilakukan dengan meningkatkan temperatur pembakaran dan turbulensi. Namun, secara termodinamika, peningkatan temperatur ini secara otomatis akan memicu lonjakan pembentukan NO_x melalui mekanisme Zeldovich. Sebaliknya, teknik seperti *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) yang digunakan untuk menurunkan temperatur puncak guna menekan NO_x, justru dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan emisi partikulat jika tidak dikelola dengan optimal (Arslan, 2025; Zhu et al., 2013).

Oleh karena itu, evaluasi efisiensi energi dan emisi pada *wheel loader* tidak dapat dipisahkan. Setiap intervensi untuk mengoptimalkan konsumsi bahan bakar (meningkatkan BTE) akan secara inheren mengubah profil termodinamika pembakaran, yang pada gilirannya akan memengaruhi karakteristik dan komposisi emisi gas buang. Pemahaman holistik terhadap hubungan termodinamika ini menjadi landasan krusial dalam pengembangan model prediksi emisi yang terintegrasi dengan siklus kerja alat berat.

2.4 Integrasi Energi-Emisi dalam Sistem Dinamis

Pendekatan pengukuran emisi karbon merupakan langkah penting untuk menilai dan memonitor dampak operasional alat berat terhadap lingkungan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah dengan mengukur intensitas karbon yang dihasilkan oleh setiap unit energi yang

digunakan dalam operasional. Dalam hal ini, emisi karbon dihitung berdasarkan konsumsi bahan bakar dan faktor emisi yang terkait dengan jenis bahan bakar yang digunakan. Faktor emisi ini seringkali diatur oleh badan lingkungan atau organisasi internasional untuk memberikan standar yang akurat dalam penghitungan emisi.

Ada beberapa pendekatan dalam pengukuran emisi karbon, antara lain:

1. Metode Pengukuran Langsung: Melalui penggunaan perangkat pemantauan yang terpasang pada alat berat untuk mengukur langsung emisi gas buang, seperti CO₂, NO_x, dan partikel lainnya. Teknologi sensor dan perangkat pengukuran emisi ini dapat memberikan data secara real-time mengenai emisi karbon yang dihasilkan selama operasional (Ge et al., 2023).
2. Modeling dan Simulasi: Pendekatan ini menggunakan model matematis untuk memprediksi jumlah emisi karbon berdasarkan data konsumsi bahan bakar dan kondisi operasional alat berat (Akhavian & H. Behzadan, 2013b).
3. Pendekatan Berbasis Data Historis: Dalam pendekatan ini, emisi karbon dihitung berdasarkan data konsumsi bahan bakar yang dikumpulkan dari berbagai alat berat selama periode tertentu, kemudian dikalibrasi dengan faktor emisi standar yang ditetapkan oleh badan lingkungan (Combustion, 2023).

Pengukuran emisi karbon tidak hanya bertujuan untuk memenuhi standar regulasi lingkungan, tetapi juga untuk mengidentifikasi peluang pengurangan emisi yang dapat dicapai melalui peningkatan efisiensi energi. Dengan menggunakan data pengukuran emisi karbon ini, perusahaan dapat merumuskan strategi untuk menurunkan jejak karbon mereka, seperti mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, mengurangi waktu idle, atau beralih ke teknologi yang lebih ramah lingkungan.

Efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon saling mendukung dalam pencapaian keberlanjutan industri. Semakin efisien penggunaan energi, semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan yang sama, yang berarti pengurangan dalam emisi karbon yang dihasilkan. Dengan mengintegrasikan teknologi efisiensi energi dan sistem monitoring emisi karbon, perusahaan dapat mencapai dua tujuan besar: mengurangi biaya operasional dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi energi dalam operasional wheel loader dengan pendekatan pengukuran emisi karbon. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan

wawasan yang lebih mendalam tentang hubungan antara konsumsi energi, efisiensi operasional, dan dampak lingkungan, serta membantu perusahaan untuk mencapai target keberlanjutan mereka.

Tinjauan pustaka ini menggarisbawahi bahwa efisiensi energi dan pengukuran emisi karbon merupakan aspek kunci dalam operasional alat berat dan keberlanjutan industri. Dengan memanfaatkan teknologi terbaru untuk meningkatkan efisiensi energi dan memonitor emisi karbon secara lebih akurat, perusahaan dapat mengurangi dampak lingkungan mereka, menghemat biaya operasional, dan berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan global.

2.4.1 Coupling antara Load Cycle, Energi, dan Emisi

Dalam operasional alat berat, konsumsi energi dan pembentukan emisi bukanlah dua entitas yang berdiri sendiri, melainkan memiliki hubungan yang terkopel (coupled) secara inheren melalui dinamika load cycle. Coupling ini merujuk pada ketergantungan langsung antara permintaan kerja mekanis yang ditentukan oleh fase operasional (loading, hauling, dumping, idle) dengan respons termodinamika mesin dalam mengonsumsi bahan bakar dan menghasilkan gas buang.

Pada fase loading, wheel loader mengalami permintaan torsi yang sangat tinggi dalam waktu singkat untuk menembus tumpukan material. Kondisi ini memaksa sistem injeksi bahan bakar untuk bekerja pada kapasitas maksimal, yang secara langsung meningkatkan konsumsi energi dan memicu lonjakan emisi transien, khususnya partikulat (soot) akibat rasio udara-bahan bakar yang sementara menjadi kaya (rich). Sebaliknya, pada fase idle, meskipun tidak ada output kerja mekanik yang dihasilkan (efisiensi kerja nol), mesin tetap mengonsumsi bahan bakar untuk mempertahankan putaran stasioner, sehingga menghasilkan emisi dasar (baseline emission) yang secara proporsional sangat tidak efisien (Hong & Lü, 2022).

Oleh karena itu, pemisahan analisis antara efisiensi energi dan emisi karbon akan menghasilkan kesimpulan yang bias. Evaluasi yang akurat mengharuskan pemetaan profil energi dan emisi secara sinkron terhadap setiap fase dalam load cycle, sehingga inefisiensi pada fase tertentu (seperti idle yang berkepanjangan) dapat diidentifikasi sebagai titik kritis (hotspot) pemborosan energi sekaligus sumber emisi yang tidak perlu (Madail et al., 2025).

2.4.2 Variabel Operasional yang Mempengaruhi

Realitas di lapangan menunjukkan bahwa profil energi dan emisi dari dua unit *wheel loader* dengan spesifikasi mesin yang identik dapat berbeda secara signifikan. Hal ini

disebabkan oleh interaksi kompleks dari berbagai variabel operasional yang dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok utama:

1. Variabel Internal dan Teknis: Meliputi kondisi kesehatan mesin (*engine health*), efisiensi sistem hidrolis, jenis transmisi, serta berat muatan (*payload*). Muatan yang melebihi kapasitas (*overloading*) akan memperpanjang durasi fase *loading* dan meningkatkan beban pada mesin, sementara muatan yang terlalu ringan (*underloading*) membuat mesin beroperasi di luar titik efisiensi optimalnya.
2. Variabel Eksternal dan Lingkungan: Kondisi medan kerja (kemiringan, jenis permukaan, dan *rolling resistance*) serta karakteristik material (kepadatan dan kelembapan) secara langsung memengaruhi resistensi yang harus dilawan oleh alat berat. Selain itu, suhu dan tekanan udara ambien memengaruhi densitas udara yang masuk ke ruang bakar, yang pada gilirannya mengubah nilai λ dan efisiensi pembakaran (Desouza et al., 2020).
3. Faktor Manusia (Perilaku Operator): Ini sering menjadi variabel dengan variabilitas tertinggi. Gaya operasi (*aggressive* vs. *smooth*), kebiasaan membiarkan mesin *idle* tanpa alasan yang jelas, serta ketepatan dalam perpindahan gigi dan penggunaan *bucket* sangat menentukan seberapa efisien energi bahan bakar dikonversi menjadi kerja yang berguna. Studi menunjukkan bahwa pelatihan operator yang tepat dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi hingga 15-20% tanpa modifikasi *hardware* (Song et al., 2026).

2.4.3 Non-linearitas Hubungan Energi-Emisi

Pendekatan konvensional dalam menghitung emisi alat berat sering kali menggunakan metode *fuel-based* dengan asumsi hubungan linear, di mana emisi dihitung sebagai hasil kali konsumsi bahan bakar dengan faktor emisi statis (misalnya, 2,68 kg CO₂/Liter diesel). Namun, dalam kondisi operasional dinamis *wheel loader*, hubungan antara energi (konsumsi bahan bakar) dan emisi bersifat sangat non-linear.

Non-linearitas ini terutama disebabkan oleh karakteristik peta kinerja mesin (*engine map*) dan respons transien. Pada kondisi beban rendah atau *idle*, konsumsi bahan bakar absolut memang rendah, tetapi *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) sangat tinggi, yang berarti emisi spesifik (gram emisi per kWh kerja) melonjak drastis karena efisiensi termal yang buruk. Sebaliknya, pada beban optimal (75-100%), mesin beroperasi dengan efisiensi pembakaran tertinggi, sehingga emisi spesifik per unit kerja justru menurun meskipun konsumsi bahan bakar absolutnya lebih tinggi (Falai & Misul, 2023).

Selain itu, fenomena *hysteresis* pada kondisi transien memperumit hubungan ini. Saat *wheel loader* berakselerasi tiba-tiba dari kondisi *idle* ke *loading*, sistem turbocharger membutuhkan waktu untuk membangun tekanan (*turbo lag*). Hal ini menyebabkan campuran bahan bakar menjadi kaya secara sesaat, memicu lonjakan emisi CO dan *soot* yang tidak proporsional dengan jumlah bahan bakar yang disuntikkan. Karena kompleksitas non-linear ini, model emisi yang mengandalkan faktor statis tidak lagi valid untuk merepresentasikan kondisi lapangan, sehingga diperlukan pendekatan pemodelan yang lebih canggih, seperti *machine learning* atau model berbasis fisika (*physics-based*), yang mampu menangkap dinamika hubungan energi-emisi secara *real-time* (Jafary Nasab et al., 2020).

2.5 Metode Pemodelan dan Optimasi

Kompleksitas dinamika operasional wheel loader, yang ditandai oleh variasi load cycle, perilaku mesin transien, dan interaksi non-linear antar parameter, membuat pendekatan analitis konvensional atau model berbasis faktor emisi statis menjadi tidak lagi memadai. Oleh karena itu, diperlukan metode pemodelan komputasi yang mampu menangkap hubungan sebab-akibat secara data-driven atau physics-informed, serta metode optimasi yang dapat menyeimbangkan berbagai tujuan yang saling bertentangan (*conflicting objectives*). Integrasi antara pemodelan prediktif dan optimasi menjadi landasan metodologis untuk mentransformasi data operasional mentah menjadi strategi pengelolaan armada yang dapat ditindaklanjuti.

2.5.1 Regresi dan Machine Learning untuk Prediksi

Dalam konteks pemodelan energi dan emisi, teknik regresi tradisional (seperti regresi linear atau polinomial) sering kali digunakan sebagai pendekatan awal. Namun, metode ini memiliki keterbatasan signifikan dalam memetakan hubungan yang sangat non-linear dan

berdimensi tinggi antara variabel input operasional (misalnya: kecepatan mesin, posisi pedal, beban hidrolik) dengan variabel output (BSFC, BTE, dan tingkat emisi).

Sebagai alternatif yang lebih robust, algoritma *Machine Learning* (ML) seperti *Random Forest* (RF), *Support Vector Regression* (SVR), dan *Artificial Neural Networks* (ANN) telah terbukti memiliki akurasi prediktif yang superior. Algoritma ML mampu mempelajari pola tersembunyi (*hidden patterns*) dari data historis bergranularitas tinggi (misalnya, data telematika yang dicatat per detik). Studi terkini menunjukkan bahwa model berbasis *ensemble learning* seperti Random Forest sangat efektif dalam memprediksi emisi *wheel loader* karena kemampuannya menangani data yang berisik (*noisy*) dan tidak memerlukan asumsi distribusi data yang ketat (Falai & Misul, 2023).

Meskipun pendekatan ML telah banyak diterapkan untuk inventarisasi emisi skala makro (tingkat negara atau wilayah), adaptasi *pipeline* pemodelan ML untuk level peralatan (*equipment-level*) dengan memanfaatkan data operasional *real-time* yang spesifik masih menjadi area pengembangan yang kritis. Penelitian ini mengadopsi pendekatan ML untuk membangun model prediktif yang secara spesifik dikalibrasi terhadap dinamika *load cycle wheel loader*.

2.5.2 Multi-Objective Optimization

Dalam operasional alat berat, tujuan operasional sering kali saling bertentangan (*trade-off*). Misalnya, upaya untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar (maksimisasi efisiensi energi) sering kali berbanding terbalik dengan upaya meminimalkan waktu siklus (*cycle time*) untuk menjaga produktivitas, atau berhadapan dengan dilema *NOx-PM trade-off* pada mesin diesel. Oleh karena itu, optimasi satu tujuan (*single-objective optimization*) tidak lagi relevan untuk memberikan solusi yang komprehensif.

Multi-Objective Optimization (MOO), khususnya yang menggunakan algoritma evolusioner seperti *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), menjadi standar emas dalam menyelesaikan masalah ini. MOO tidak mencari satu solusi "terbaik" tunggal, melainkan menghasilkan serangkaian solusi optimal yang dikenal sebagai *Pareto Front*. Setiap titik pada *Pareto Front* merepresentasikan kondisi operasi di mana tidak ada satu pun tujuan (misalnya, pengurangan emisi) yang dapat diperbaiki tanpa mengorbankan tujuan

lainnya (misalnya, peningkatan konsumsi bahan bakar) (Deb et al., 2002; Ostad-Ali-Askari et al., 2025; Zhang et al., 2023). Dengan memetakan *Pareto Front* berdasarkan model prediktif yang telah divalidasi, penelitian ini dapat memberikan rekomendasi strategi operasi yang konkret. Manajer armada dapat memilih titik operasi tertentu pada *Pareto Front* yang paling sesuai dengan prioritas perusahaan, apakah itu memprioritaskan penghematan biaya bahan bakar, kepatuhan terhadap regulasi emisi, atau keseimbangan di antara keduanya.

2.5.3 State-of-the-Art dalam Pemodelan Alat Berat

Sebagian besar studi terdahulu mengenai konsumsi energi dan emisi pada alat berat masih mengandalkan pendekatan fuel-based yang mengasumsikan hubungan linear antara konsumsi bahan bakar dan emisi melalui faktor emisi statis (Budihardjo et al., 2021). Pendekatan ini, meskipun praktis untuk pelaporan makro, memiliki keterbatasan signifikan karena tidak mempertimbangkan dinamika operasional nyata seperti variasi load cycle, perilaku mesin transien, dan interaksi non-linear antar parameter operasional (Awang et al., 2021; Mohd Tamam et al., 2023).

Studi yang telah mengintegrasikan analisis load cycle umumnya masih bersifat deskriptif dan terbatas pada karakterisasi fase operasi tanpa mengembangkan model prediktif yang dapat mensimulasikan skenario "what-if" (Panjaitan et al., 2023). Sementara itu, pendekatan machine learning untuk prediksi emisi telah menunjukkan akurasi tinggi pada skala makro (negara/wilayah) (Begum & Mobin, 2025), namun belum banyak diadaptasi untuk level peralatan (equipment-level) dengan granularitas data operasional tinggi seperti yang dibutuhkan dalam konteks wheel loader.

Tabel 2. 1. Matriks Sintesis Studi Terdahulu dan Positioning Penelitian

Penulis (Tahun)	Objek Studi	Pendekatan Metodologis	Keterbatasan	Research Gap
(Budihardjo et al., 2021)	Kendaraan berat kota	IPCC Tier-2, BAU projection	Asumsi steady-state, tidak tangkap dinamika siklus	Mengintegrasikan load cycle modeling untuk representasi operasi dinamis

(Begum & Mobin, 2025)	Emisi CO ₂ negara	ML (SVR, RF, ANN) + SSFS	Skala makro, data tahunan, tidak spesifik alat berat	Adaptasi pipeline ML untuk level peralatan dengan data operasional granular
(Mohd Tamam et al., 2023)	Mesin diesel generator	Eksperimen BSFC/BTE, emulsi bahan bakar	Fokus pada modifikasi bahan bakar, bukan pemodelan operasional	Pengembangan model prediktif berbasis parameter operasional, bukan modifikasi hardware
(Awang et al., 2021)	Campuran WPO-biodiesel	Uji performa mesin, analisis tribologi	Skala laboratorium, tidak ada model prediktif sistemik	Pemodelan sistemik yang menghubungkan parameter operasional → energi → emisi
(Panjaitan et al., 2023)	Industri semen	Studi kasus kualitatif, determinan adopsi teknologi	Fokus pada faktor manajerial, bukan pemodelan teknis	Integrasi pendekatan teknis (pemodelan) dengan pertimbangan operasional lapangan
(Zahari et al., 2024)	Peak shaving industri	Review sistematis +	Fokus pada manajemen permintaan, bukan	Spesifik pada wheel loader dengan integrasi model energi-

		studi kasus PV-BESS	pemodelan emisi alat berat	emisi berbasis load cycle
--	--	---------------------	----------------------------	---------------------------

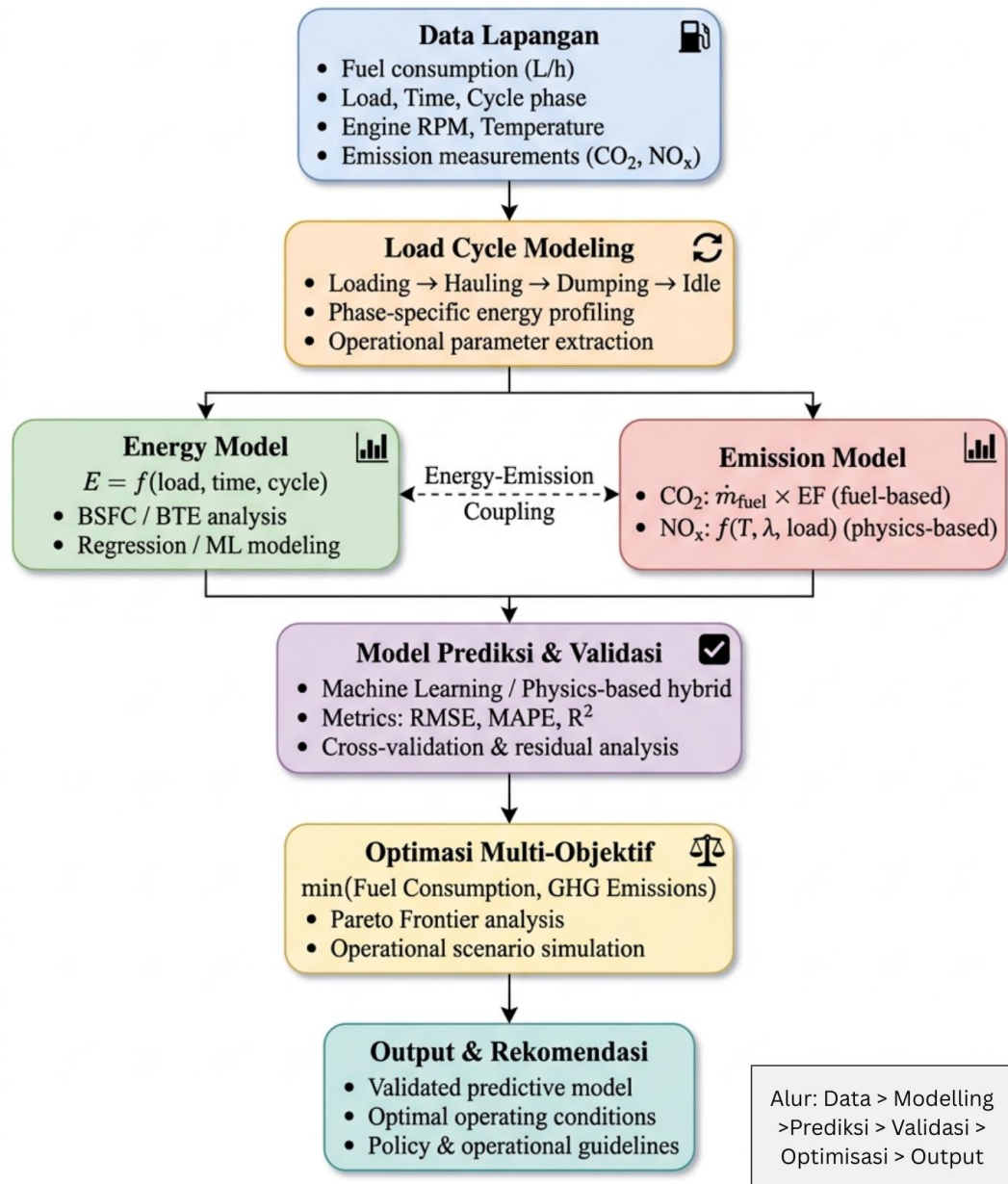
Berdasarkan kerangka konseptual di atas, penelitian ini memposisikan diri sebagai pengembangan metodologis yang mengisi tiga research gap:

1. Dari pendekatan statis menuju dinamika operasional: Berbeda dengan studi fuel-based yang mengasumsikan operasi steady-state, penelitian ini mengintegrasikan load cycle modeling untuk merepresentasikan variasi fase operasi (loading, hauling, dumping, idle) yang secara substansial memengaruhi konsumsi energi dan pembentukan emisi (Awang et al., 2021; Mohd Tamam et al., 2023).
2. Dari deskripsi menuju prediksi: Melampaui studi yang bersifat deskriptif atau eksperimental terbatas (Awang et al., 2021; Panjaitan et al., 2023), penelitian ini mengembangkan model prediktif berbasis machine learning dan/atau pendekatan physics-based yang mampu mensimulasikan skenario operasional berbeda, sehingga memiliki nilai aplikatif untuk perencanaan dan pengendalian sistem.
3. Dari evaluasi menuju optimasi: Tidak berhenti pada analisis kinerja, penelitian ini menerapkan optimasi multi-objektif untuk mengidentifikasi trade-off antara minimisasi konsumsi energi dan emisi, serta menghasilkan rekomendasi strategi operasi yang dapat ditindaklanjuti oleh praktisi industri.

Kontribusi novelty penelitian ini terletak pada integrasi keempat komponen (load cycle, energy modeling, emission modeling, optimization) dalam satu kerangka yang koheren, dengan fokus pada level peralatan (wheel loader) dan granularitas data operasional tinggi. Pendekatan ini belum banyak dijumpai dalam literatur terdahulu, sehingga membuka peluang kontribusi metodologis yang signifikan bagi bidang pemodelan energi-emisi alat berat.

Berdasarkan sintesis di atas, peneliti mengusulkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan empat komponen utama: (1) Load Cycle Modeling, (2) Energy Modeling, (3) Emission Modeling, dan (4) Multi-Objective Optimization. Kerangka ini dirancang untuk menjawab ketiga rumusan masalah secara berurutan dan saling terkait, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.3.

Kerangka Konseptual: Integrasi *Load Cycle*, Pemodelan Energi-Emisi, dan Optimasi Operasional *Wheel Loader*



Gambar 2.3. Bagan kerangka konseptual

Kerangka ini mencerminkan alur penelitian yang sistematis: dimulai dari pengumpulan data operasional wheel loader, pemodelan load cycle untuk mengkuantifikasi variasi fase operasi, pengembangan model energi dan emisi yang saling terkopel, validasi model terhadap data lapangan, hingga optimasi multi-objektif untuk identifikasi kondisi operasi optimal. Pendekatan ini memungkinkan penelitian untuk tidak hanya menjelaskan

"apa yang terjadi" tetapi juga "mengapa terjadi" dan "bagaimana jika kondisi diubah", sehingga memenuhi standar analitis penelitian magister.



