

## Pengaruh variasi laju kendaraan dan beban muatan terhadap karakteristik emisi gas buang mesin diesel

<sup>1</sup>Kurniawan Dwi Alfiyan, <sup>2\*</sup>Ethys Pranoto, <sup>3</sup>Riza Pahlevi Marwanto

<sup>1,2</sup>Teknologi Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan <sup>3</sup>Rekayasa Sistem Transportasi Jalan,  
Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan

<sup>1,2,3</sup>Jl. Abdul Syukur 17, Margadana, Tegal 52143, Indonesia

<sup>1</sup>alfiyandwikurniawan514@gmail.com, <sup>2</sup>ethys@pktj.ac.id, <sup>3</sup>riza.pahlevi@pktj.ac.id

### Abstract

This study aims to analyze the influence of variations in vehicle speed and payload on exhaust gas emission characteristics as well as combustion behavior in a diesel engine. Tests were conducted on a pickup vehicle with speed variations of 20, 30, 40, and 50 km/h and payloads of 0 kg, 587 kg, and 700 kg. The emission parameters analyzed include carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), oxygen (O<sub>2</sub>), and smoke opacity, measured using a gas analyzer and smoke tester. The results show that increases in vehicle speed and load indicate a tendency in the combustion process from relatively stable conditions toward incomplete combustion, as indicated by significant increases in CO, HC, and opacity. The observed findings suggest a tendency toward over-fueling conditions at high loads, where increased fuel supply is not matched by adequate air supply in a naturally aspirated diesel engine, resulting in locally rich zones within the combustion chamber. This condition reduces combustion quality and increases the formation of incomplete oxidation products. The increase in CO<sub>2</sub> emissions reflects higher fuel consumption due to greater power demand, but does not necessarily indicate improved combustion efficiency. Meanwhile, relatively stable O<sub>2</sub> levels suggest that combustion inefficiency may be influenced by limitations in air-fuel mixing and reaction time, rather than a global oxygen deficiency. These results indicate an indirect decrease in energy conversion efficiency and an increase in pollutant emissions. Therefore, controlling vehicle operating conditions is important to improve energy efficiency and reduce diesel engine exhaust emissions.

**Keywords:** diesel engine, emissions, opacity, payload, vehicle speed.

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi laju kendaraan dan beban muatan terhadap karakteristik emisi gas buang serta perilaku pembakaran pada mesin diesel. Pengujian dilakukan pada kendaraan *pick-up* dengan variasi laju 20, 30, 40, dan 50 km/jam serta beban muatan 0 kg, 587 kg, dan 700 kg. Parameter emisi yang dianalisis meliputi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), oksigen (O<sub>2</sub>), dan opasitas asap yang diukur menggunakan *gas analyzer* dan *smoke tester*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan laju dan beban menyebabkan pergeseran proses pembakaran dari kondisi relatif stabil menuju pembakaran tidak sempurna, yang ditandai dengan peningkatan signifikan pada CO, HC, dan opasitas. Fakta yang teramati mengidentifikasi kecenderungan terjadinya *over-fueling* pada beban tinggi, di mana peningkatan suplai bahan bakar tidak diimbangi oleh suplai udara yang memadai pada mesin diesel *naturally aspirated*, sehingga terbentuk zona kaya lokal di dalam ruang bakar. Kondisi ini menurunkan kualitas pembakaran dan meningkatkan pembentukan produk oksidasi tidak sempurna. Peningkatan emisi CO<sub>2</sub> mencerminkan bertambahnya konsumsi bahan bakar akibat kebutuhan daya yang lebih tinggi, namun tidak secara langsung menunjukkan peningkatan efisiensi pembakaran. Sementara itu, kadar O<sub>2</sub> yang relatif stabil mengindikasikan bahwa ketidaksempurnaan pembakaran lebih disebabkan oleh keterbatasan pencampuran udara-bahan bakar dan waktu reaksi, bukan oleh kekurangan oksigen secara global. Hasil penelitian ini

---

---

mengindikasikan penurunan efisiensi konversi energi secara tidak langsung serta meningkatkan emisi polutan. Oleh karena itu, pengendalian kondisi operasi kendaraan menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan menekan emisi gas buang mesin diesel.

**Kata Kunci:** beban muatan, emisi, laju kendaraan, mesin diesel, opasitas.

---

---

## 1. Pendahuluan

Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan tren yang signifikan dan berimplikasi langsung terhadap penurunan kualitas udara perkotaan. Peningkatan populasi kendaraan tersebut berbanding lurus dengan kenaikan emisi gas buang yang dilepaskan ke atmosfer. Data menunjukkan bahwa sekitar 47% pencemaran udara, atau setara dengan  $\pm 19\,165$  ton per hari, berasal dari sektor transportasi darat, khususnya emisi kendaraan bermotor [1]. Hal ini menegaskan bahwa sektor transportasi di mana naiknya jumlah kendaraan akan menaikkan konsumsi bahan bakar yang pada akhirnya menjadi kontributor dominan terhadap beban pencemaran udara [2], [3].

Di antara berbagai jenis kendaraan, kendaraan bermesin diesel yang beroperasi di jalan raya masih banyak digunakan. Kendaraan bermesin diesel memiliki keandalan dalam torsi yang besar, konsumsi bahan bakar yang efisien, dan ketahanan yang tinggi [4]. Namun demikian, kendaraan bermesin diesel merupakan salah satu kontributor signifikan terhadap pencemaran udara sekaligus peningkatan beban penyakit yang berkaitan dengannya. Selain menurunkan kualitas udara dan berdampak merugikan pada kesehatan masyarakat, emisi karbon hitam yang dihasilkan dari gas buang mesin diesel juga berperan signifikan dalam mempercepat pemanasan iklim dalam jangka pendek [5]–[7]. Karakteristik proses pembakaran pada mesin diesel, terutama pada kendaraan dengan usia pakai tinggi dan perawatan yang kurang optimal, berpotensi menghasilkan partikulat dan gas pencemar dalam konsentrasi yang signifikan [8]. Kondisi ini memperparah akumulasi polutan di udara, terutama di kawasan dengan kepadatan lalu lintas tinggi.

Kendaraan ringan mesin diesel, terutama pada kendaraan dengan teknologi injeksi tidak langsung (*indirect injection*) atau sistem diesel konvensional, masih banyak dijumpai pada armada operasional di sektor logistik dan transportasi barang di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh faktor biaya operasional, umur ekonomis kendaraan yang panjang, serta masih digunakannya kendaraan tersebut dalam kegiatan distribusi harian. Selain itu, kendaraan jenis ini masih menjadi kendaraan bermotor wajib uji berkala (uji KIR) di Indonesia, sehingga evaluasi emisi pada kondisi operasional aktualnya tetap relevan dalam konteks regulasi dan pengendalian emisi berbasis keberadaan kendaraan. Kondisi ini memperkuat urgensi untuk melakukan kajian terhadap karakteristik emisi pada kendaraan diesel konvensional yang masih beroperasi di lapangan, khususnya dalam kondisi variasi beban dan laju kendaraan.

Indeks kualitas udara menjadi fokus utama di perkotaan, khususnya di wilayah kota-kota besar, karena indikator ini berperan sebagai ukuran kesehatan masyarakat dan tingkat kenyamanan lingkungan di suatu kawasan [9]–[11]. Kontribusi kendaraan bermotor yang tinggi di perkotaan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya polusi udara, yang selanjutnya dapat meningkatkan risiko berbagai gangguan kesehatan pada masyarakat [12]. Paparan polutan seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), serta partikulat dapat meningkatkan risiko gangguan sistem pernapasan, penyakit kardiovaskular, hingga penurunan kualitas hidup secara umum bahkan gas pencemar tersebut bersifat racun [13]–[15]. Oleh karena itu, pengendalian emisi kendaraan menjadi aspek krusial dalam upaya mitigasi dampak lingkungan dan kesehatan.

Parameter emisi seperti kadar CO, HC, serta tingkat opasitas atau ketebalan asap merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kualitas proses pembakaran pada mesin kendaraan. Pada mesin diesel, emisi yang dihasilkan umumnya lebih mudah diamati secara

visual. Asap berwarna hitam pekat mengindikasikan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna, yang menyebabkan tingginya kandungan partikulat dan senyawa karbon tak terbakar dalam gas buang [3], [16]. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efisiensi mesin, tetapi juga meningkatkan beban pencemaran udara.

Menyikapi permasalahan tersebut, peran pemerintah menjadi sangat strategis dalam menekan tingkat pencemaran udara dari sektor transportasi. Upaya yang dilakukan antara lain melalui penetapan regulasi terkait ambang batas emisi, pelaksanaan uji emisi berkala, serta pengawasan terhadap kepatuhan kendaraan bermotor terhadap standar lingkungan yang berlaku. Kebijakan ini diharapkan mampu mendorong perbaikan sistem pembakaran kendaraan, peningkatan kualitas bahan bakar, serta kesadaran masyarakat dalam menjaga kelayakan teknis kendaraan, sehingga kontribusi sektor transportasi terhadap pencemaran udara dapat diminimalkan secara berkelanjutan.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji berbagai faktor yang memengaruhi karakteristik emisi gas buang kendaraan bermotor. Beberapa penelitian membahas mengenai perubahan karakteristik dari emisi gas buang dan daya kinerjanya pada kendaraan berat bermesin diesel yang disebabkan oleh penggunaan teknologi emisi mesin, pemakaian bahan alternatif yang disertai dengan zat aditif yang digunakan dalam campuran bahan bakar alternatif [17]–[22]. Penelitian lain menunjukkan bahwa variasi laju kendaraan yang merupakan parameter operasional mempengaruhi karakteristik emisi nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), terutama pada kondisi laju rendah yang umum terjadi pada lalu lintas perkotaan [23]. Selain itu, kajian pada kendaraan bermesin bensin menunjukkan bahwa variasi muatan kendaraan turut memengaruhi konsentrasi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) yang dihasilkan, di mana peningkatan beban cenderung berkorelasi dengan perubahan karakter emisi [24]. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji parameter operasional seperti laju kendaraan dan beban muatan, sebagian besar penelitian tersebut menganalisis faktor-faktor tersebut secara terpisah. Selain itu, penelitian yang secara simultan mengevaluasi interaksi antara laju kendaraan dan beban muatan terhadap karakteristik emisi pada kendaraan ringan bermesin diesel masih terbatas, khususnya dalam konteks operasional perkotaan di Indonesia. Di sisi lain, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan menggunakan *chassis dynamometer* dengan simulasi beban jalan yang ideal, sehingga belum banyak kajian eksperimental berbasis fasilitas uji kendaraan lapangan yang merepresentasikan kondisi operasional nyata namun dengan keterbatasan alat uji.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan eksperimental yang menganalisis secara simultan pengaruh variasi laju kendaraan dan beban muatan terhadap emisi gas buang pada kendaraan diesel ringan menggunakan fasilitas uji kendaraan yang umum tersedia. Pendekatan ini memberikan perspektif yang lebih aplikatif terhadap kondisi operasional nyata di sektor transportasi logistik perkotaan. Selain itu, penelitian ini mengkaji hubungan kedua parameter tersebut terhadap beberapa indikator emisi secara bersamaan, yaitu karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), oksigen ( $\text{O}_2$ ), serta opasitas asap, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik pembakaran mesin diesel pada berbagai kondisi operasi.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis hubungan keterkaitan antara variabel perlakuan dan respons yang dihasilkan. Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti mengendalikan variabel tertentu serta mengamati secara langsung pengaruh perlakuan terhadap variabel terikat dalam kondisi yang terkontrol. Melalui desain ini, hubungan kecenderungan antara faktor yang dimanipulasi dan perubahan parameter yang diamati dapat diuji secara sistematis dan terukur. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara kuantitatif untuk memastikan validitas dan

reliabilitas temuan penelitian. Pelaksanaan penelitian dilakukan di UPT Pengujian Kendaraan Bermotor Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur, sebagai fasilitas yang memiliki peralatan pengujian kendaraan bermotor. Pengujian dilakukan menggunakan *speedometer tester* untuk menyimulasikan kondisi kendaraan bergerak tanpa perpindahan posisi secara aktual. Namun demikian, alat ini tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi beban dinamis di jalan (*road load*) sebagaimana pada *chassis dynamometer* yang dilengkapi sistem inersia dan pengendalian beban. Pembebanan dalam penelitian ini dilakukan secara fisik dengan menambahkan massa pada kendaraan, sehingga lebih merepresentasikan beban statis terhadap kerja mesin dibandingkan resistansi jalan secara keseluruhan seperti hambatan aerodinamis, *rolling resistance*, dan efek inersia kendaraan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diinterpretasikan secara terbatas pada kondisi pengujian terkontrol.

Objek penelitian yang digunakan adalah kendaraan *pick-up* bak terbuka bermesin diesel, yaitu Isuzu Panther TBR 54. Kendaraan ini dilengkapi sistem transmisi manual lima percepatan. Ukuran kendaraan memiliki jarak sumbu roda 2 680 mm, panjang 4 405 mm, lebar 1 740 mm, serta tinggi sekitar 1 770 mm, yang merepresentasikan karakteristik umum kendaraan niaga ringan bermesin diesel yang banyak dioperasikan untuk keperluan distribusi barang.



**Gambar 1.** Alat yang digunakan dalam pengukuran dari kiri ke kanan, *smoke tester*, *gas analyzer*, dan *roller speedometer tester*

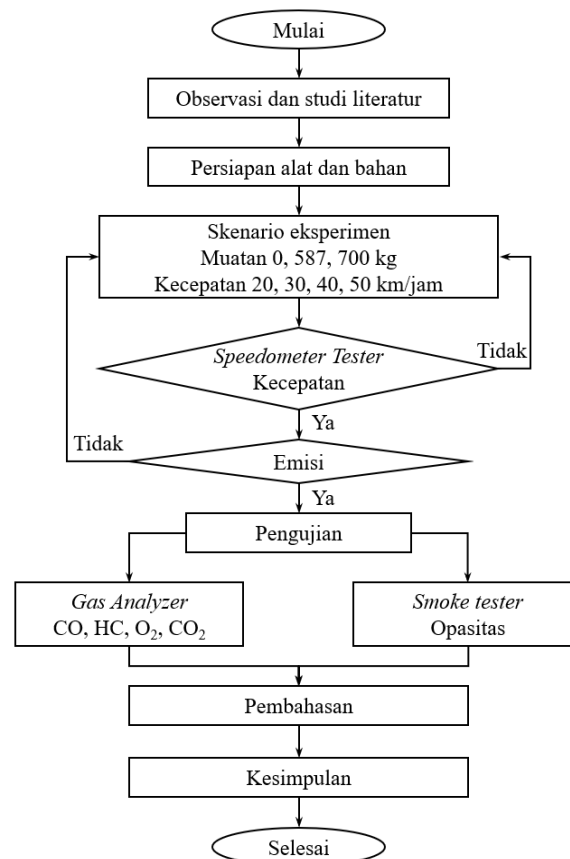
Pengujian dilakukan dengan memvariasikan tiga kondisi beban, yaitu 0 kg (tanpa muatan), 587 kg, dan 700 kg, serta empat variasi laju, yaitu 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam, untuk merepresentasikan kondisi operasional aktual di jalan. Variasi beban muatan 0 kg, 587 kg, dan 700 kg digunakan untuk merepresentasikan kondisi pembebanan yang berbeda berdasarkan Jumlah Berat yang Diizinkan (JBI) kendaraan. Beban 0 kg sebagai kondisi awal tanpa pembebanan untuk memperoleh kondisi acuan sistem sebelum adanya pengaruh beban. Beban 587 kg merepresentasikan kondisi pembebanan normal yang masih berada dalam batas JBI, sehingga mencerminkan kondisi operasional yang diperbolehkan sesuai ketentuan. Adapun beban 700 kg digunakan untuk menyimulasikan kondisi *overloading*, yaitu pembebanan yang melebihi JBI, sebagai bentuk skenario ketidaksesuaian terhadap aturan untuk mengevaluasi pengaruh variasi beban muatan.

Dalam pelaksanaan pengujian, posisi gigi transmisi (*gear*) tidak ditetapkan sebagai variabel yang dikontrol maupun dicatat secara spesifik. Dengan demikian, putaran mesin (RPM) yang terjadi pada setiap variasi laju tidak dapat ditentukan secara pasti. Kondisi ini menjadi keterbatasan dalam analisis karena parameter seperti efisiensi volumetris dan karakteristik pembakaran berbasis RPM tidak dapat dievaluasi secara langsung. Penelitian ini difokuskan pada hubungan antara laju kendaraan dan beban terhadap parameter emisi yang diukur.

Variasi laju kendaraan dalam penelitian ini dibatasi hingga 50 km/jam dengan mempertimbangkan aspek operasional dan keselamatan pengujian. Karakteristik operasional kendaraan *pick-up* sebagai kendaraan niaga ringan yang beroperasi dalam rentang laju rendah hingga sedang untuk distribusi barang di area perkotaan, sehingga variasi tersebut relevan untuk menggambarkan kondisi operasional aktual. Penggunaan *speedometer tester* konvensional tanpa sistem pengikat kendaraan (*vehicle restraint system*) setara standar

*chassis dynamometer* industri berpotensi menimbulkan ketidakstabilan kendaraan, terutama pada kondisi beban tinggi hingga 700 kg. Selain itu, pada kecepatan yang lebih tinggi terdapat potensi terjadinya slip antara roda kendaraan dan *roller* yang dapat memengaruhi akurasi pengukuran serta keselamatan pengujian. Batasan maksimum 50 km/jam ditetapkan dengan pertimbangan untuk menjaga stabilitas kendaraan, keselamatan operator, dan konsistensi data eksperimen.

Proses pengujian dimulai dengan menyiapkan variasi beban muatan yang terdiri atas 0 kg, 587 kg, dan 700 kg pada kendaraan uji. Setelah beban dipasang sesuai dengan variasi yang telah ditentukan, kendaraan kemudian diuji pada beberapa tingkat laju, yaitu 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *speedometer tester* untuk memverifikasi dan mengontrol laju kendaraan, *axle load tester* untuk mengukur beban kendaraan secara akurat, *smoke tester* merek Iyasaka untuk mengukur tingkat kepekatan asap (*opacity*), serta *gas analyzer* merek Iyasaka untuk mengukur konsentrasi gas buang yang meliputi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan oksigen (O<sub>2</sub>), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Data hasil pengukuran kemudian diolah dan dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi kecenderungan serta pengaruh masing-masing variabel bebas (laju kendaraan dan beban muatan) terhadap parameter emisi gas buang yang diukur.

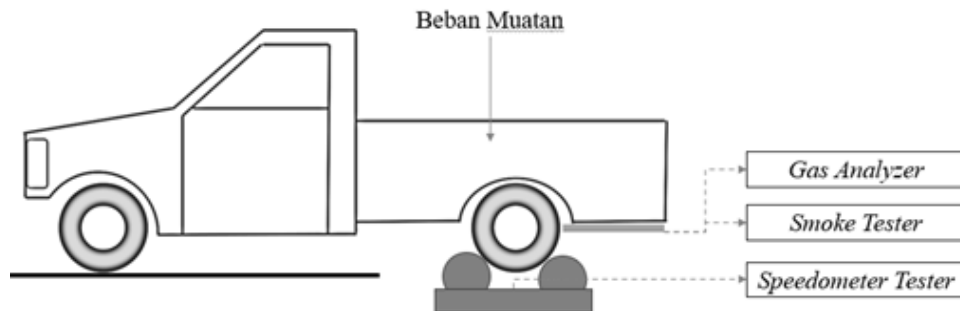


**Gambar 2.** Diagram alur penelitian

Proses pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian eksperimental yang terkontrol di fasilitas uji kendaraan. Kendaraan ditempatkan di atas *roller speedometer tester* untuk mensimulasikan kondisi operasional bergerak tanpa perpindahan posisi secara aktual. Perangkat ini digunakan untuk mengukur dan memverifikasi laju kendaraan agar sesuai dengan variasi yang telah ditentukan, yaitu 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam, pada setiap kondisi beban yang diuji. Dengan metode ini, konsistensi

laju kendaraan dapat dijaga selama proses pengambilan data, sehingga meminimalkan deviasi pengukuran akibat faktor eksternal. Proses pengujian dimulai dengan menyiapkan kendaraan tanpa beban muatan. Selanjutnya kendaraan kemudian diuji pada beberapa tingkat laju, yaitu 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam, sebanyak lima kali perulangan untuk tiap variasi laju. Kemudian, hasil pengujian tersebut, dihitung nilai rata-rata untuk setiap variabel yang diukur. Pendekatan perulangan ini diterapkan untuk meningkatkan validitas serta mengurangi pengaruh kesalahan acak. Proses pengujian yang sama dilakukan untuk beban muatan 587 kg, dan 700 kg. Bagaimana alur penelitian berjalan diilustrasikan pada Gambar 2.

Pengukuran emisi gas buang dilakukan dengan memasukkan *probe gas analyzer* dan *smoke tester* ke dalam ujung pipa knalpot kendaraan sesuai dengan prosedur standar pengujian emisi. *Gas analyzer* digunakan untuk mengukur konsentrasi gas buang yang meliputi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan oksigen (O<sub>2</sub>), sedangkan *smoke tester* digunakan untuk menentukan tingkat kepekatan asap (*opacity*) pada mesin diesel. Dalam penelitian ini, emisi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) tidak diukur karena keterbatasan instrumen, di mana *gas analyzer* yang digunakan tidak dilengkapi dengan sensor pengukuran NO<sub>x</sub>. Meskipun demikian, parameter emisi yang diukur (CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan opasitas) tetap dapat memberikan representasi yang memadai terhadap karakteristik pembakaran dan kualitas emisi mesin diesel, khususnya yang berkaitan dengan proses pembakaran tidak sempurna, efisiensi pembakaran, serta pembentukan partikulat. Skema penempatan alat dan konfigurasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 3. Pendekatan ini memungkinkan pengukuran parameter emisi dilakukan secara simultan dan akurat pada setiap kombinasi variasi laju dan beban yang diuji.



Gambar 3. Diagram alur eksperimen

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil yang disajikan penelitian ini merupakan nilai rerata pengukuran parameter emisi karbon monoksida, hidrokarbon, karbon dioksida, oksigen dan kepekatan asap pada mesin diesel pada variasi laju kendaraan 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam, dengan kondisi pembebanan sebesar 0 kg, 587 kg, dan 700 kg. Analisis difokuskan pada keterkaitan fenomena pembakaran dan karakteristik termodinamika yang mendasarinya.

#### 3.1 Emisi karbon monoksida (CO)

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 1, ketika laju ditingkatkan menjadi 30 km/jam, terjadi kenaikan kadar CO secara bertahap, yakni 0.036% pada beban 0 kg, 0.042% pada 587 kg, dan 0.054% pada 700 kg. Peningkatan ini menjadi semakin signifikan pada laju 40 km/jam, dengan nilai masing-masing 0.048% untuk tanpa beban muatan, 0.058% dengan muatan 587 kg, dan 0.168% dengan muatan 700 kg. Tren kenaikan paling mencolok teramati pada laju 50 km/jam, terutama pada beban tertinggi, di mana konsentrasi CO mencapai 0.080% untuk 0 kg, 0.191% untuk 587 kg, dan meningkat tajam

hingga 0.493% pada beban 700 kg. Data menunjukkan tren peningkatan CO yang tidak linear terhadap kenaikan laju dan beban.

Lonjakan tajam ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya kondisi *over-fueling*, di mana suplai bahan bakar meningkat signifikan tanpa diimbangi peningkatan suplai udara yang memadai, khususnya pada mesin diesel *naturally aspirated*. Namun, jika melihat data O<sub>2</sub> yang relatif stabil (~17.6%) mengindikasikan bahwa faktor lain selain kekurangan oksigen global berperan, melainkan keterbatasan pencampuran lokal (*local rich zone*) dan waktu reaksi pada putaran tinggi.

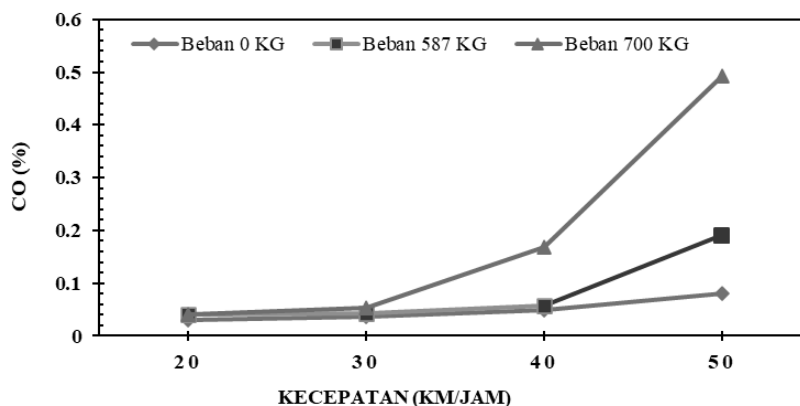
Pembakaran yang tidak ideal merupakan kondisi pembakaran di dalam ruang bakar yang tidak berlangsung secara optimal, sehingga oksidasi bahan bakar tidak sepenuhnya menghasilkan karbon dioksida, melainkan masih menghasilkan produk antara seperti karbon monoksida. Pembentukan karbon dioksida dari karbon monoksida dapat berlangsung melalui tahap oksidasi lanjutan, apabila tersedia oksigen yang cukup, kondisi temperatur yang tinggi, serta waktu reaksi yang memadai di dalam ruang bakar.

**Tabel 1.** Hasil emisi gas CO (%)

Muatan (kg)	Laju (km/jam)			
	20	30	40	50
0	0.030	0.036	0.048	0.080
587	0.040	0.042	0.058	0.190
700	0.040	0.054	0.168	0.493

Gambar 4 menunjukkan tren peningkatan rata-rata emisi karbon monoksida yang konsisten seiring dengan kenaikan laju kendaraan dan beban muatan kendaraan. Pada laju terendah, yaitu 20 km/jam, konsentrasi CO relatif rendah dan stabil pada seluruh variasi beban, masing-masing sebesar 0.03% pada beban 0 kg serta 0.04% pada beban 587 kg dan 700 kg. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada putaran mesin yang rendah di mana laju kendaraan rendah, mengidentifikasi kecenderungan proses pembakaran yang lebih optimal sehingga pembentukan CO sebagai produk pembakaran tidak sempurna dapat ditekan. Hal ini disebabkan waktu tinggal (*residence time*) yang lebih panjang memungkinkan oksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub> berlangsung lebih optimal.

Emisi CO yang rendah pada laju rendah menunjukkan kecenderungan pembakaran yang lebih optimal, mendekati kondisi pembakaran yang lebih homogen dan optimal. Ketersediaan oksigen yang memadai serta waktu reaksi yang cukup pada putaran mesin rendah memungkinkan oksidasi lanjutan CO menjadi CO<sub>2</sub>. Kondisi ini juga mengindikasikan pencampuran udara-bahan bakar yang relatif homogen. Namun demikian, mengingat kompleksitas proses pembakaran di dalam silinder, interpretasi ini tetap bersifat indikatif.



**Gambar 4.** Diagram hasil emisi gas CO

Peningkatan emisi CO tersebut berkaitan erat dengan karakteristik kerja mesin diesel. Penambahan beban mengharuskan sistem injeksi memasok bahan bakar dalam jumlah yang lebih besar guna memenuhi kebutuhan daya. Kenaikan kebutuhan daya dipengaruhi oleh pembebanan yang diterima oleh kendaraan karena akselerasi menaikkan laju maupun beban muatan [3], [25], [26]. Pada kondisi beban tinggi yang disertai peningkatan laju, durasi pembakaran menjadi lebih singkat akibat bertambahnya frekuensi siklus kerja mesin, sementara laju injeksi bahan bakar meningkat secara signifikan. Kombinasi kedua faktor tersebut berpotensi menurunkan homogenitas campuran dan efektivitas oksidasi, sehingga fraksi karbon yang teroksidasi secara parsial menjadi CO meningkat. Fenomena ini menjelaskan korelasi positif antara kenaikan laju, peningkatan beban, dan bertambahnya konsentrasi emisi CO yang terukur dalam penelitian ini.

### 3.2 Emisi hidrokarbon (HC)

Hasil pengujian emisi hidrokarbon (HC) yang disajikan dalam satuan *parts per million* (ppm) seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 memperlihatkan kecenderungan peningkatan konsentrasi HC seiring dengan bertambahnya laju kendaraan, maupun kenaikan beban muatan. Pada laju terendah, yaitu 20 km/jam, emisi HC masih berada pada kisaran relatif rendah, yakni 14.6 ppm pada kondisi tanpa beban, meningkat menjadi 16.0 ppm pada beban 587 kg, dan 18.8 ppm pada beban 700 kg.

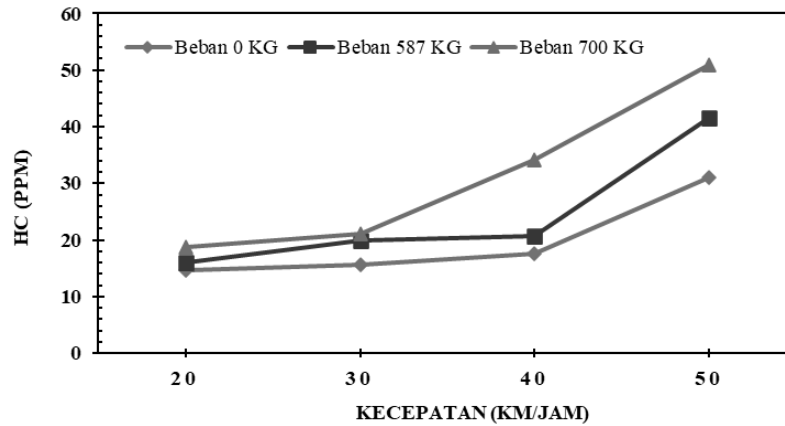
**Tabel 2.** Hasil emisi gas HC (ppm)

Muatan (kg)	Laju (km/jam)			
	20	30	40	50
0	14.6	15.6	17.6	31.0
587	16.0	20.0	20.6	41.6
700	18.8	21.0	34.2	51.0

Pengujian dilakukan pada variasi laju 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam dengan tiga kondisi pembebanan, yaitu tanpa muatan (0 kg), beban sesuai daya angkut (587 kg), dan beban melebihi daya angkut (700 kg). Secara umum, data menunjukkan adanya hubungan positif antara peningkatan beban dan laju terhadap besarnya emisi HC yang dihasilkan mesin seperti pada Gambar 5. Kenaikan bertahap terjadi pada laju 30 km/jam dan 40 km/jam, yang menunjukkan bahwa peningkatan beban memberikan pengaruh korelasi terhadap proses pembakaran di dalam ruang bakar. Bertambahnya beban menyebabkan kebutuhan daya meningkat untuk mempertahankan pada laju yang sama, sehingga suplai bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam silinder juga lebih besar. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efektivitas pencampuran udara dan bahan bakar serta memperbesar kemungkinan terjadinya pembakaran tidak sempurna, yang tercermin dari meningkatnya konsentrasi HC sebagai sisa bahan bakar yang tidak terbakar.

Peningkatan paling signifikan tercatat pada laju 50 km/jam, di mana nilai HC meningkat dari 31.0 ppm pada kondisi tanpa beban menjadi 41.6 ppm pada beban 587 kg, dan mencapai 51.0 ppm pada beban 700 kg. Lonjakan ini mengindikasikan bahwa kombinasi laju tinggi dan beban berat menyebabkan mesin bekerja pada kondisi beban termal dan mekanis yang lebih tinggi. Pada kondisi tersebut, waktu pembakaran menjadi lebih singkat akibat meningkatnya frekuensi siklus kerja, sementara jumlah bahan bakar yang diinjeksikan bertambah untuk memenuhi kebutuhan torsi. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak mengalami oksidasi secara sempurna dan terlepas sebagai emisi HC. Peningkatan ini sebagai akibat dari kecenderungan terkait dengan *incomplete combustion* yang dipicu oleh keterbatasan atomisasi dan pencampuran bahan bakar pada beban tinggi. Pada putaran tinggi, waktu atomisasi dan pencampuran menjadi semakin singkat. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak terbakar dan

keluar sebagai HC [3], [25], [26]. Penelitian sebelumnya yang dilakukan pada truk diesel semi trailer menunjukkan bahwa beban kendaraan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tingkat emisi gas buang pada truk berat, bahkan ketika kondisi lalu lintas tetap sama [27]. Hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan bahwa beban kendaraan dan laju kendaraan berkontribusi signifikan terhadap kenaikan emisi karbon monoksida, hidrokarbon, yang merefleksikan penurunan kualitas proses pembakaran pada kondisi operasi yang lebih berat.



Gambar 5. Diagram hasil emisi gas HC

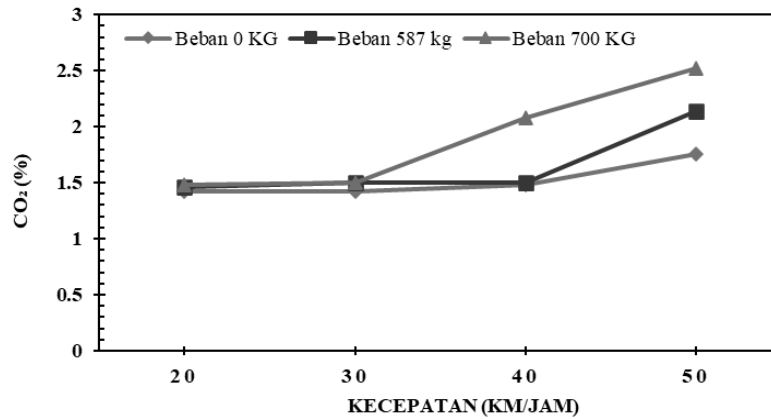
### 3.3 Emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

Hasil perhitungan nilai rata-rata emisi karbon dioksida dalam satuan persen (%), diperoleh gambaran karakteristik pembentukan CO<sub>2</sub> pada kendaraan bermesin diesel yang diuji pada empat variasi laju, yaitu 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam, dengan tiga kondisi pembebanan: tanpa muatan, muatan 587 kg, dan muatan 700 kg ditampilkan pada Tabel 3. Secara umum, grafik pada Gambar 6 menunjukkan pola peningkatan emisi CO<sub>2</sub> yang relatif konsisten seiring dengan bertambahnya laju dan beban kendaraan, dengan kenaikan yang semakin nyata pada kondisi laju tinggi dan beban berat. Peningkatan CO<sub>2</sub> menunjukkan meningkatnya total bahan bakar yang terbakar, bukan semata-mata peningkatan efisiensi pembakaran.

**Tabel 3.** Hasil emisi gas CO<sub>2</sub> (%)

Muatan (kg)	Laju (km/jam)			
	20	30	40	50
0	1.42	1.42	1.48	1.76
587	1.46	1.50	1.50	2.14
700	1.48	1.50	2.08	2.52

Pada laju 20 km/jam, konsentrasi CO<sub>2</sub> masih berada pada kisaran rendah dan perbedaannya antar variasi beban tidak terlalu signifikan, yaitu 1.42% pada beban 0 kg, 1.46% pada 587 kg, dan 1.48% pada 700 kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada putaran mesin rendah, laju konsumsi bahan bakar masih relatif terkendali sehingga peningkatan beban belum memberikan dampak yang signifikan terhadap jumlah CO<sub>2</sub> yang dihasilkan. Pola serupa masih terlihat pada laju 30 km/jam, dengan nilai CO<sub>2</sub> berkisar antara 1.42% hingga 1.50%. Meskipun kenaikan yang terjadi relatif kecil, tren ini mengindikasikan adanya kontribusi peningkatan beban terhadap intensitas pembakaran dan jumlah karbon yang teroksidasi menjadi CO<sub>2</sub>.



**Gambar 6.** Diagram hasil emisi gas CO<sub>2</sub>

Peningkatan emisi CO<sub>2</sub> menjadi lebih jelas pada laju 40 km/jam. Pada kondisi ini, nilai CO<sub>2</sub> tercatat sebesar 1.48% untuk beban 0 kg, meningkat menjadi 1.50% pada 587 kg, dan melonjak hingga 2.08% pada 700 kg. Kenaikan yang cukup signifikan pada beban tertinggi menunjukkan bahwa mesin bekerja pada tingkat pembebanan yang lebih besar, sehingga kebutuhan energi meningkat dan suplai bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar juga bertambah. Kondisi ini mendorong terjadinya oksidasi karbon yang lebih intensif, sehingga fraksi CO<sub>2</sub> sebagai produk utama pembakaran meningkat [3], [25], [26].

Fenomena tersebut semakin menonjol pada laju 50 km/jam. Emisi CO<sub>2</sub> tercatat sebesar 1.76% pada beban 0 kg, meningkat menjadi 2.14% pada beban 587 kg, dan mencapai nilai tertinggi 2.52% pada beban 700 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi laju tinggi dan beban berat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar secara signifikan, yang berimplikasi langsung pada peningkatan jumlah karbon yang teroksidasi sempurna menjadi CO<sub>2</sub>. Data penelitian ini menegaskan bahwa kenaikan laju dan beban kendaraan tidak hanya memengaruhi emisi hasil pembakaran tidak sempurna, tetapi juga meningkatkan produksi CO<sub>2</sub> sebagai indikator bahan bakar penambahan proses pembakaran pada mesin diesel atau mengindikasikan peningkatan *fuel throughput* (konsumsi bahan bakar), bukan peningkatan kualitas pembakaran.

### 3.4 Kandungan oksigen (O<sub>2</sub>)

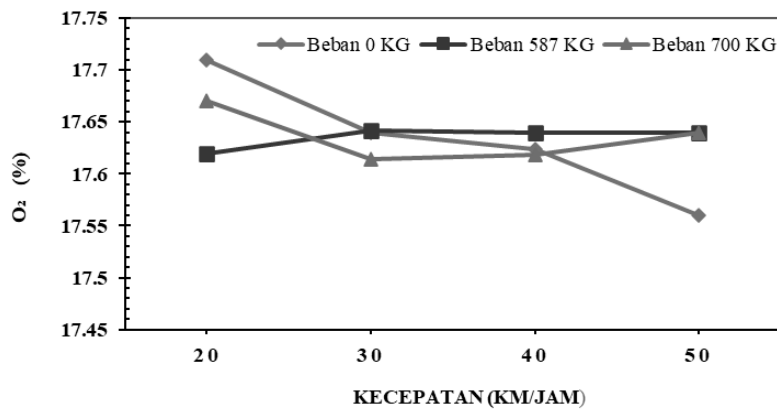
Hasil pengujian kandungan oksigen dalam gas buang menunjukkan relatif stabil pada setiap kombinasi laju kendaraan dan beban muatan kendaraan, meskipun ada perubahan yang terjadi relatif kecil dibandingkan dengan parameter emisi lainnya. Pada laju 20 km/jam, konsentrasi O<sub>2</sub> tertinggi tercatat pada kondisi tanpa beban sebesar 17.71%, kemudian menurun menjadi 17.62% pada beban 587 kg dan sedikit meningkat kembali menjadi 17.67% pada beban 700 kg, seperti ditunjukkan Tabel 4. Variasi ini mengindikasikan bahwa pada putaran rendah, perubahan beban tidak menyebabkan perbedaan yang signifikan dalam fraksi oksigen sisa hasil pembakaran.

**Tabel 4.** Kandungan O<sub>2</sub> (%) dalam gas buang

Muatan (kg)	Laju (km/jam)			
	20	30	40	50
0	17.71	17.64	17.62	17.56
587	17.62	17.64	17.64	17.64
700	17.67	17.61	17.62	17.64

Ketika laju meningkat menjadi 30 km/jam, nilai O<sub>2</sub> cenderung stabil dengan selisih antar beban yang semakin kecil, yakni 17.64% pada kondisi tanpa beban, 17.64% pada beban 587 kg, dan 17,61% pada beban 700 kg. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tidak terjadi perubahan signifikan pada oksigen sisa yang relatif seimbang terhadap peningkatan kebutuhan bahan bakar. Pada laju 40 km/jam, rata-rata kadar O<sub>2</sub> sedikit menurun untuk seluruh parameter, dengan rentang nilai antara 17.62% hingga 17,62%. Penurunan tipis ini kemungkinan terkait dengan peningkatan konsumsi oksigen akibat bertambahnya jumlah bahan bakar yang diinjeksikan untuk memenuhi kebutuhan daya pada laju menengah.

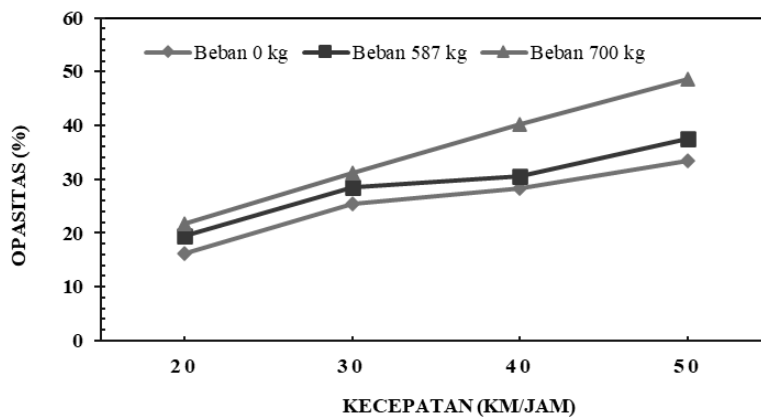
Pada laju tertinggi, yaitu 50 km/jam, kadar O<sub>2</sub> pada kondisi tanpa beban menurun menjadi 17.56%, sedangkan pada beban 587 kg dan 700 kg nilainya tercatat sama, yaitu 17.64%. Secara umum, stabilnya kadar O<sub>2</sub> menunjukkan bahwa secara global tidak menunjukkan indikasi kuat adanya defisiensi oksigen global seperti ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 7. Diagram kandungan O<sub>2</sub>

### 3.5 Ketebalan Asap (Opasitas)

Berdasarkan grafik opasitas gas buang pada Gambar 8, terlihat adanya hubungan yang konsisten antara peningkatan laju kendaraan dan penambahan beban muatan terhadap kenaikan nilai opasitas. Opasitas merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kegelapan asap gas buang, yang umumnya berkaitan dengan indikasi peningkatan partikel karbon (jelaga) akibat proses pembakaran yang tidak sempurna di dalam ruang bakar mesin diesel. Dengan demikian, nilai opasitas yang lebih tinggi mengindikasikan kualitas pembakaran yang semakin menurun dan potensi emisi partikulat yang lebih besar. Kenaikan ini merupakan indikator tidak langsung terjadinya pembentukan partikulat akibat *over-fueling*.



Gambar 8. Diagram opasitas gas buang

Pada laju 20 km/jam, nilai opasitas tercatat sebesar 16.26% untuk beban 0 kg, meningkat menjadi 19.48% pada beban 587 kg, dan 21.82% pada beban 700 kg. Tren peningkatan ini berlanjut pada laju 30 km/jam, dengan nilai opasitas masing-masing 25.38%, 28.42%, dan 31.2%. Selanjutnya, pada laju 40 km/jam, nilai opasitas mencapai 28.3% (0 kg), 30.64% (587 kg), dan 40.26% (700 kg). Peningkatan paling signifikan terjadi pada laju 50 km/jam, di mana opasitas mencapai 33.4% untuk beban 0 kg, 37.44% untuk beban 587 kg, dan 48.72% untuk beban 700 kg. Data pada Tabel 5 menunjukkan bahwa baik variabel laju kendaraan maupun beban muatan memiliki kontribusi yang sinergis terhadap peningkatan opasitas gas buang.

**Tabel 5.** Hasil opasitas (%) gas buang

Muatan (kg)	Laju (km/jam)			
	20	30	40	50
0	16.26	25.38	28.30	33.40
587	19.48	26.42	30.64	37.40
700	21.82	31.20	40.26	48.72

Secara mekanis, peningkatan beban kendaraan menyebabkan kebutuhan daya mesin bertambah, sehingga suplai bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar juga meningkat. Kondisi ini terjadi karena pompa injeksi mekanis meningkatkan suplai bahan bakar secara signifikan pada beban tinggi, sementara mesin *naturally aspirated* tidak mampu meningkatkan suplai udara secara proporsional. Di sisi lain, kemungkinan berkaitan dengan peningkatan putaran mesin (RPM). Pada putaran mesin yang lebih tinggi, waktu yang tersedia untuk proses atomisasi, pencampuran, dan pembakaran bahan bakar menjadi lebih singkat. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak terbakar secara optimal dan menghasilkan jelaga yang meningkatkan nilai opasitas. Kondisi ini menyebabkan terjadinya *locally fuel-rich combustion* yang memicu pembentukan jelaga dalam jumlah besar, sehingga meningkatkan opasitas [3], [26].

Variasi laju dan beban operasi mesin diesel menunjukkan kecenderungan pengaruh terhadap karakteristik pembakaran, emisi gas buang, dan efisiensi energi. Efisiensi pembakaran secara tidak langsung diasosiasikan melalui indikator emisi seperti CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan partikulat, yang masing-masing mencerminkan mekanisme kehilangan energi pada proses konversi bahan bakar [28]. Kondisi laju kendaraan dan muatan rendah, waktu pencampuran bahan bakar dan udara di ruang bakar lebih memiliki waktu, meningkatkan homogenitas campuran, sehingga pembakaran lebih sempurna yang ditunjukkan oleh rendahnya emisi CO dan HC serta meningkatnya fraksi CO<sub>2</sub> sebagai indikator intensitas konsumsi bahan bakar. Kondisi ini mengindikasikan konversi energi bahan bakar yang lebih efektif pembakarannya. Sebaliknya, ketika laju dan beban mesin meningkat secara simultan, kondisi dalam silinder berubah secara signifikan yang menyebabkan proses pencampuran udara bahan bakar menjadi kurang homogen. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas pembakaran yang ditandai dengan meningkatnya emisi CO dan HC. Peningkatan kedua parameter tersebut menunjukkan adanya energi bahan bakar yang tidak berhasil dikonversi secara optimal menjadi energi berguna, sehingga mengindikasikan penurunan efisiensi energi secara tidak langsung. Selain itu, kondisi pembakaran tidak homogen pada beban tinggi juga meningkatkan pembentukan partikulat, yang merupakan indikator tambahan penurunan kualitas pembakaran dan efisiensi energi.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa peningkatan laju kendaraan dan beban muatan pada mesin diesel berkorelasi dengan peningkatan emisi CO, HC, dan opasitas

akibat indikasi kecenderungan kondisi *over-fueling* pada mesin *naturally aspirated*, di mana suplai bahan bakar tidak diimbangi oleh suplai udara yang memadai sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna. Sementara itu, peningkatan CO<sub>2</sub> lebih menunjukkan peningkatan konsumsi bahan bakar seiring kebutuhan daya, bukan peningkatan efisiensi pembakaran, sedangkan kadar O<sub>2</sub> yang relatif stabil mengindikasikan keterbatasan pencampuran dan waktu reaksi dalam ruang bakar. Secara keseluruhan, kondisi operasi beban dan laju tinggi mengindikasikan penurunan efisiensi energi secara tidak langsung karena sebagian energi bahan bakar tidak dikonversi menjadi kerja mekanis. Pada penelitian selanjutnya disarankan penggunaan *chassis dynamometer* agar simulasi beban lebih presisi serta perluasan rentang laju dan beban untuk memperoleh hasil yang lebih komprehensif.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Unit Pelaksana Uji Berkala Kendaraan Bermotor Kabupaten Trenggalek yang telah memberikan memfasilitasi peralatan uji dalam penelitian ini.

### Pernyataan

**Kontribusi Penulis.** K.D.A.: konseptualisasi penelitian, perancangan metode, penerapan konsep, analisis data, penulisan konsep awal naskah. E.P.: pengawasan penelitian, evaluasi hasil, peninjauan dan penyuntingan naskah, persetujuan akhir naskah, supervisi penelitian. R.P.M.: pengawasan penelitian, pengawasan pengumpulan dan pengolahan data, dan validasi eksperimen.

**Pendanaan.** Penelitian ini didanai oleh penulis pribadi.

**Konflik Kepentingan.** Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan terkait publikasi artikel ini.

**Ketersediaan Data.** Data tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

**Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI).** Penulis menyatakan bahwa penggunaan alat berbasis kecerdasan buatan (AI) hanya terbatas pada aspek penyuntingan bahasa dan tidak mempengaruhi substansi ilmiah penelitian.

### Daftar Referensi

- [1] R. Rahadiansyah, "Polusi udara membara, truk ODOL saja masih ada," *detikoto*, Jakarta, 2023. [Online]. Available: <https://oto.detik.com/berita/d-6888807/polusi-udara-membara-truk-odol-saja-masih-ada>
- [2] A. V Shash and C. Gosai, "Performance of four stroke diesel engine, focusing combustion modeling and cycle analysis," *Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 270–279, 2015.
- [3] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1997.
- [4] M. A. Kurniawan, A. E. Fahmadi, Y. Oktopianto, and S. Shofiah, "Teknologi diesel particulat filter sebagai upaya mengurangi emisi gas buang dan kebisingan mesin diesel kendaraan niaga," *J. Keselam. Transp. Jalan*, vol. 8, no. 2, pp. 116–125, 2021, doi: 10.46447/ktj.v8i2.350.
- [5] ICCT, "ICCT International Council on Clean Transportation Annual Report 2021," Washington, 2023. [Online]. Available: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/07/ICCT-Annual-Report-2021-fv.pdf>
- [6] R. Singh, C. Sharma, and M. Agrawal, "Emission inventory of trace gases from road

- transport in India,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 52, pp. 64–72, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.02.011.
- [7] Y. Wu *et al.*, “On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook,” *Sci. Total Environ.*, vol. 574, pp. 332–349, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.040.
- [8] I. D. Farilla, A. Akbar, and R. Firdaus, “Analysis of the impact of exhaust gas emissions on diesel-fueled vehicles in view from the year of manufacture (case study on the Mitsubishi L 300 vehicle),” *J. Terap. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 128–133, 2024, doi: 10.37373/jttm.v5i1.916.
- [9] F. F. Adli and A. S. Arifin, “Sistem monitoring gas CO pada parkir basement mall di Jakarta menggunakan metode real-time berbasis Internet of Things ( IoT ),” *J. Ilm. Teknol. dan Rekayasa*, vol. 24, no. 3, pp. 171–181, 2019, doi: 10.35760/tr.2019.v24i3.2394.
- [10] Y. Lin, Y. Li, K. T. T. Amesho, F. Chou, and P. Cheng, “Characterization and quantification of PM<sub>2.5</sub> emissions and PAHs concentration in PM<sub>2.5</sub> from the exhausts of diesel vehicles with various accumulated mileages,” *Sci. Total Environ.*, vol. 694, pp. 188–198, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.007.
- [11] X. Guo, L. Fu, M. Ji, J. Lang, D. Chen, and S. Cheng, “Scenario analysis to vehicular emission reduction in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region , China,” *Environ. Pollut.*, vol. 216, pp. 470–479, 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.05.082.
- [12] E. M. Nurmaya, S. H. Murti, and E. Nurjani, “Kajian pencemaran lingkungan terhadap kesehatan masyarakat akibat gas buangan CO kendaraan bermotor di kawasan Universitas Gadjah Mada,” *J. Paradig.*, vol. 5, no. 1, pp. 16–38, 2024, doi: 10.22146/jpmpm.v5i1.91392.
- [13] V. V Raming, J. M. L. Umbroh, and F. Warouw, “Literature review: Gambaran risiko kesehatan pada masyarakat akibat paparan gas karbon monoksida (CO),” *J. KESMAS*, vol. 11, no. 4, pp. 95–101, 2022.
- [14] H. Yang *et al.*, “Chemical Characterization of Fine Particulate Matter in Gasoline and Diesel Vehicle Exhaust,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 19, pp. 1439–1449, 2019, doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0191.
- [15] M. Kim, D. Park, M. Kim, J. Heo, S. Park, and H. Chong, “A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives,” *Int. J. Environ. Res. Public Heal.*, vol. 17, pp. 1–12, 2020, doi: doi:10.3390/ijerph17113788.
- [16] Ponidi and I. M. Rohman, “Pengaruh penggunaan bahan bakar biosolar, biosolar dengan aditive dan Pertamina Dex pada Mitsubishi L-300 terhadap kepekatan asap,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 1, pp. 73–82, 2021, doi: 10.30596/rmme.v4i1.6698.
- [17] A. Sasmita, Y. Yohanes, and K. Yolanda, “Analisis emisi gas buang dari mesin diesel modifikasi dipengaruhi daya mesin dan bahan bakar campuran oli bekas dan Dexlite,” *Semesta Tek.*, vol. 25, no. 2, pp. 170–178, 2022, doi: 10.18196/st.v25i2.13748.
- [18] F. Majedi, A. Aminudin, I. Puspitasari, A. Tranggono, A. Salim, and A. F. Yusri, “Effects of bio-oil - diesel blends: the performance and emissions of diesel engines with heater on fuel blends,” *Motiv. J. Mech. Electr. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 389–396, 2023, doi: 10.46574/motivection.v5i2.229.
- [19] A. R. N. Iqlima and R. Firdaus, “The effect of using bio-solar fuel with Additives,

- Solar Dexlite and Pertamina Dex on Mitsubishi L300 diesel in 2007 on vehicle smoke density,” *Indones. J. Innov. Stud.*, vol. 14, 2021, doi: 10.21070/ijins.v14i.537.
- [20] Q. B. Doan *et al.*, “Performance and emission characteristics of diesel engine using ether additives: A review,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 1, pp. 255–274, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.42522.
- [21] M. A. Fayad *et al.*, “Emissions characteristics and engine performance from the interaction effect of EGR and diesel-ethanol blends in diesel engine,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 4, pp. 991–1001, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.45051.
- [22] H. Pratomo, P. Saksono, and M. Ferdnian, “Analisis pengaruh jenis bahan bakar terhadap nilai emisi gas buang pada diesel engine common rail system,” *Al Jazari, J. Ilm. Tek. Mesi*, vol. 8, no. 2, pp. 88–93, 2023, doi: 10.31602/al-jazari.v8i2.12730.
- [23] L. F. Mendonça da Silva, M. R. Barros de Alencar, A. H. Moraes Nunes, and A. Gioda, “Real-time analysis of NOx emissions in heavy duty diesel vehicles: Impact of speed and variations across vehicle groups,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 16, no. 9, 2025, doi: 10.1016/j.apr.2025.102572.
- [24] Gunawan, A. R. Novianto, and Ayondya, “Pengaruh muatan dan kecepatan kendaraan terhadap hasil emisi gas buang,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 2, pp. 165–172, 2023, doi: 10.29303/dtm.v13i2.683.
- [25] Daryanto, *Teknik Motor Diesel*, 3rd ed. Bandung, Indonesia: Alfabeta, 2023.
- [26] C. R. Ferguson and A. T. Kirkpatrick, *Internal Combustion Engines Applied Thermosciences*, 3rd ed. Colorado, USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [27] X. Wang, G. Song, Z. Zhai, Y. Wu, H. Yin, and L. Yu, “Effects of vehicle load on emissions of heavy-duty diesel trucks: A study based on real-world data,” *Int. J. Environ. Res. Public Heal.*, vol. 18, no. 8, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/ijerph18083877.
- [28] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine ( ICE ) Fundamentals*. New York, USA: McGraw-Hill, 1998. doi: 10.1002/9781118991978.hces077.