

Pengaruh Beban dan Dimensi Muatan Berlebih Terhadap Aerodinamika dan Biaya Operasi Kendaraan Berbasis Simulasi CFD dan Model HDM-4

Impact of Overloading and Overdimensioned Loads on Vehicle Aerodynamics and Operating Costs Using CFD Simulation and HDM-4 Model

Pradhana Wahyu Nariendra^{1*}, Juanita²,

¹Program Studi Manajemen Transportasi, Sekolah Logistik dan Transportasi
Universitas Logistik dan Bisnis Internasional
Jl. Sari Asih no 54, Bandung 40151, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Muhammadiyah Purwokerto
Jl. Raya Dukuh Waluh, Kembaran 53182, Indonesia.

Corresponding author: pradhana@ulbi.ac.id

ABSTRAK

DOI:
[10.30595/jrst.v10i1.30021](https://doi.org/10.30595/jrst.v10i1.30021)

Article information:

Received:
30/12/2025

Revised:
01/03/2026

Accepted:
05/03/2026

Praktik Overdimension dan Overloading (ODOL) pada truk angkutan batubara di Indonesia berkontribusi terhadap peningkatan Biaya Operasi Kendaraan (BOK), pemborosan energi, dan percepatan kerusakan infrastruktur jalan. Meskipun model HDM-4 telah banyak digunakan untuk estimasi biaya operasional, sebagian besar studi masih mengandalkan parameter aerodinamika default yang belum merepresentasikan perubahan geometri akibat muatan berlebih. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan estimasi BOK yang lebih akurat melalui integrasi simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan kalibrasi model HDM-4 Level II pada kondisi overload progresif. Analisis dilakukan pada truk bak terbuka konfigurasi sumbu 1.2 dengan lima skenario muatan antara 8 hingga 12 ton. Parameter aerodinamika aktual berupa luas area frontal (AF) dan koefisien hambatan (Cd) diperoleh melalui simulasi CFD dan digunakan sebagai input kalibrasi dalam model HDM-4 untuk menghitung biaya bahan bakar, pelumas, dan ban. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan muatan dari 8 menjadi 12 ton meningkatkan AF dari 4,08 m² menjadi 4,69 m² dan menaikkan Cd dari 0,73 menjadi 0,87, yang memperbesar hambatan aerodinamis dan kebutuhan daya mesin. Secara ekonomi, kondisi tersebut meningkatkan biaya bahan bakar sebesar 13,06% dan biaya ban sebesar 3,55% dibandingkan muatan standar. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi parameter aerodinamika aktual ke dalam HDM-4 menghasilkan estimasi BOK yang lebih sensitif terhadap perubahan konfigurasi muatan. Pendekatan ini memberikan kontribusi metodologis dalam evaluasi dampak ekonomi praktik ODOL serta mendukung penguatan kebijakan pengendalian muatan berlebih.

Kata Kunci: overloading, overdimension, hambatan aerodinamis, luas area frontal, biaya operasional

ABSTRACT

Overdimension and overloading (ODOL) practices in coal transport trucks in Indonesia contribute to increased Vehicle Operating Costs (VOC), energy inefficiency, and accelerated road infrastructure deterioration. Although the HDM-4 model has been widely applied for operational cost estimation, most previous studies rely on default aerodynamic parameters that do not adequately represent geometric changes caused by excessive loading. This study aims to develop a more accurate VOC estimation by integrating Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations with calibration of the HDM-4 Level II model under progressive overload conditions. The analysis was conducted on open-body trucks with a 1.2 axle configuration across five loading scenarios ranging from 8 to 12 tonnes. Actual aerodynamic parameters, including frontal area (AF) and drag coefficient (Cd), were obtained through CFD simulations and incorporated into the HDM-4 model to estimate fuel, lubricant, and tyre costs. The results indicate that increasing the payload from 8 to 12 tonnes enlarges the frontal area from 4.08 m² to 4.69 m² and raises the drag coefficient from 0.73 to 0.87, thereby increasing aerodynamic resistance and engine power demand. Economically, this condition leads to a 13.06% increase in fuel costs and a 3.55% increase in tyre costs compared with the standard load condition. These findings demonstrate that integrating actual aerodynamic parameters into the HDM-4 framework produces VOC estimates that are more sensitive to variations in loading configuration. The proposed approach provides methodological contributions to evaluating the economic impacts of ODOL practices and supports the strengthening of overload control policies.

Keywords: *overloading, overdimension, aerodynamic resistance, frontal area, operating costs*

1. PENDAHULUAN

Praktik *Overdimension* dan *Overload* (ODOL) masih menjadi tantangan utama dalam sistem angkutan barang di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia. Truk dengan muatan berlebih (*overloading*) dan dimensi kendaraan berlebih (*overdimension*) terbukti mempercepat kerusakan jalan, meningkatkan biaya pemeliharaan, serta memperbesar risiko kecelakaan lalu lintas (Budiharjo et al., 2022; Chan, 2008). Secara regulasi, truk yang melebihi batas beban gandar maksimum atau berat bruto kendaraan yang diizinkan akan menggeser pusat gravitasi, meningkatkan tegangan pada gandar, serta menurunkan kinerja pengereman, terutama pada kondisi basah atau jalan menurun (Karim et al., 2013; Li et al., 2008). Dampak ini tidak hanya mengancam keselamatan tetapi juga memperpendek umur rencana jalan, yang mana infrastruktur yang dirancang untuk 10 tahun dapat mengalami kerusakan dalam 5,6 tahun akibat kelebihan muatan (NZ Transport Agency, 2017; Simanjuntak et al., 2014). Bahkan, temuan menunjukkan hingga 87,85% truk melampaui batas pada jembatan timbang di Indonesia (Budiharjo et al., 2022), dipicu oleh tingginya persaingan operator, lemahnya penegakan hukum, dan orientasi pada efisiensi biaya jangka pendek (Arifaini & Soeskandi, 2022; Carson, 2011; Chen et al., 2020; Jacob & Feypell-de La Beaumelle, 2010).

Fenomena ODOL di Indonesia telah berkembang menjadi pola sistemik, terutama pada truk bak terbuka yang digunakan untuk mengangkut komoditas berat. Jenis kendaraan ini paling sering melampaui batas muatan legal karena mudah dimodifikasi, berbiaya operasional rendah, serta kurangnya pengawasan di lapangan (Harun et al., 2024; Jihanny et al., 2018; Wilches et al., 2019). Harun et al. (2024) mencatat bahwa sekitar 49% truk kargo di Sulawesi Selatan bertipe bak terbuka dan 60% di antaranya melebihi batas muatan. Hasil serupa ditemukan oleh Jihanny et al. (2018) di Jalan Lintas Timur Sumatera, yang mana lebih dari 60% truk beroperasi di atas beban gandar legal dan mempercepat kerusakan perkerasan. Studi di Kolombia juga memperkuat temuan ini, menunjukkan bahwa truk bak terbuka berukuran besar menjadi penyumbang utama degradasi jalan akibat muatan tambang tanpa penutup pelindung (Wilches et al., 2019).

Secara umum, praktik ODOL pada kendaraan angkutan barang merupakan permasalahan utama dalam transportasi jalan karena mempercepat degradasi perkerasan, meningkatkan konsumsi energi, serta menaikkan biaya operasi kendaraan (BOK). Studi internasional menunjukkan bahwa praktik ODOL paling dominan terjadi pada angkutan komoditas curah, khususnya batubara, yang memiliki karakteristik nilai ekonomi per satuan berat

relatif rendah, volume angkutan sangat besar, dan frekuensi operasi tinggi pada koridor logistik tertentu. Kondisi ini mendorong operator untuk memaksimalkan muatan per perjalanan guna menekan biaya transportasi per ton-kilometer, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap percepatan degradasi struktural perkerasan jalan (de Saxe et al., 2023). Pola serupa juga ditemukan di Indonesia, yang mana truk batubara beroperasi dengan muatan jauh melebihi daya dukung jalan, yang berdampak pada percepatan kerusakan jalan, peningkatan risiko kecelakaan, serta tingginya biaya pemeliharaan infrastruktur (Nariendra & Juanita, 2023). Oleh karena itu, angkutan batubara merepresentasikan konteks yang relevan untuk mengkaji dampak operasional ODOL terhadap kinerja ekonomi transportasi jalan dan kebutuhan pemeliharaan infrastruktur.

Selain meningkatkan beban struktural perkerasan, dimensi kendaraan yang berlebih juga memperluas bidang frontal dan meningkatkan hambatan aerodinamis, yang berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar (Mirmahdi et al., 2021; Nariendra & Lestiani, 2025). Hambatan aerodinamis meningkat proporsional terhadap kuadrat kecepatan, sehingga kendaraan berprofil besar mengonsumsi bahan bakar lebih banyak (Delgado et al., 2017). Desain kendaraan yang aerodinamis dengan koefisien hambatan rendah (C_d) terbukti lebih efisien (Heisler, 2002). Namun, pelanggaran dimensi bak truk masih sering terjadi meskipun batas tinggi maksimum telah ditetapkan (Direktorat Perhubungan Darat, 2003), sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar, keausan ban, dan beban pengereman (Nariendra et al., 2026; Setiawan & Tjahjono, 2020). Mengingat bahan bakar merupakan komponen terbesar dari Biaya Operasi Kendaraan (BOK), yang mencapai 21–49% dari total biaya operasi (Brasukra & Hergesel, 2008; Kadarsa et al., 2019), peningkatan konsumsi bahan bakar akan berdampak langsung pada efisiensi operasional. Selain itu, berat muatan memiliki pengaruh signifikan terhadap konsumsi bahan bakar, yang mana peningkatan beban secara proporsional meningkatkan kebutuhan energi mesin untuk mempertahankan kecepatan operasional (Nariendra et al., 2026).

Model Highway Development and Management (HDM-4) telah digunakan secara luas untuk menganalisis konsumsi bahan bakar

dan biaya operasional kendaraan (Bennett & Paterson, 2000). Namun, sebagian besar studi sebelumnya masih menggunakan parameter default tanpa mempertimbangkan variasi berat kendaraan dan kelandaian jalan (Jiao & Bienvenu, 2015; Ko et al., 2016; Zaabar & Chatti, 2010). Penyesuaian parameter aerodinamis, seperti luas bidang frontal dan koefisien hambatan, terbukti dapat meningkatkan akurasi prediksi (Nariendra & Lestiani, 2025; Perrotta et al., 2019). Karena itu, kalibrasi khusus dibutuhkan terutama untuk kendaraan berat (Posada-Henao et al., 2023), dan adaptasi terhadap kondisi lokal menjadi penting (Odoki & Kerali, 2006).

Kesenjangan penelitian terletak pada belum adanya kalibrasi HDM-4 Level II yang mengintegrasikan parameter aerodinamika aktual truk dengan beban dan dimensi muatan berlebih berdasarkan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan data operasi di lapangan. Tanpa proses kalibrasi yang memadai, estimasi BOK berpotensi bias karena tidak sepenuhnya merefleksikan pengaruh kondisi operasional dan karakteristik kendaraan yang sesungguhnya (Ko et al., 2016; Perrotta et al., 2019; Setiawan & Tjahjono, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan kalibrasi HDM-4 Level II dengan memasukkan parameter aerodinamis hasil simulasi, termasuk koefisien hambatan (C_d) dan luas area frontal (AF). Kalibrasi nilai koefisien drag (C_d) dan frontal area (AF) tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap performa aktual truk di Indonesia (Nariendra & Lestiani, 2025).

Kebaruan ilmiah penelitian ini terletak pada integrasi parameter aerodinamika aktual hasil simulasi CFD ke dalam kalibrasi model HDM-4 Level II untuk kendaraan dengan beban dan dimensi muatan berlebih. Pendekatan ini memungkinkan estimasi konsumsi bahan bakar dan BOK yang lebih akurat pada kondisi operasi nyata angkutan batubara di Indonesia, dibandingkan dengan penggunaan parameter default yang selama ini berlaku. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model estimasi BOK yang lebih akurat melalui kalibrasi HDM-4 Level II berbasis parameter aerodinamika aktual pada truk batubara dengan beban dan dimensi muatan berlebih. Pendekatan ini diharapkan dapat mendukung penguatan implementasi kebijakan Zero ODOL serta peningkatan efisiensi logistik dan keselamatan transportasi barang di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menganalisis dampak praktik kelebihan beban dan dimensi muatan terhadap BOK pada truk angkutan batubara melalui integrasi simulasi CFD dan pemodelan HDM-4 Level II. Studi dilakukan pada Jalan Lingkar Barat di Provinsi Jambi, yang merupakan koridor utama angkutan batubara dengan tingkat pelanggaran overloading yang tinggi dan berulang selama periode 2022–2025 (Budiharjo et al., 2022). Truk batubara di koridor ini beroperasi dengan berat bruto kendaraan sekitar 16 ton, yang terdiri dari berat kosong kendaraan sekitar 4 ton dan muatan (*payload*) hingga 12 ton. Kondisi ini merepresentasikan praktik overload progresif yang melampaui kapasitas desain kendaraan sekitar 8 ton serta meningkatkan beban terhadap infrastruktur jalan (Nariendra & Juanita, 2023) serta pada tahun 2020 tercatat lebih dari 2.500 pelanggaran overloading (Liputantanjab, 2021). Penumpukan muatan tanpa penyesuaian struktur kendaraan meningkatkan risiko kecelakaan dan gangguan lingkungan akibat getaran kendaraan berat (Subhan, 2015; Yang et al., 2021). Meskipun telah diterbitkan peraturan daerah dan surat edaran gubernur, efektivitas pengendalian masih rendah karena belum tersedianya jalur khusus angkutan batubara (Pemerintah Provinsi Jambi, 2021; Santoso, 2022; Suwandi, 2022), sehingga koridor ini dipilih sebagai lokasi studi yang representatif untuk mengevaluasi dampak operasional overloading terhadap BOK.

Untuk merepresentasikan kondisi operasional truk secara nyata, penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder. Data primer meliputi berat muatan kendaraan, komponen BOK yang diperoleh melalui wawancara dengan pengemudi/operator, kecepatan operasi rata-rata yang diukur menggunakan metode moving car observer, serta geometri jalan yang ditentukan melalui Google Earth. Data sekunder mencakup spesifikasi teknis truk, dimensi bak truk sesuai peraturan yang berlaku di Indonesia, data perkerasan dan nilai *International Roughness Index* (IRI) diperoleh dari Kementerian Pekerjaan Umum, serta variabel lingkungan (suhu, tekanan udara, kelembaban, dan densitas udara) yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik Provinsi Jambi dan *International Standard Atmosphere*. Nilai densitas batubara dan parameter dasar kalibrasi HDM-4 diperoleh dari literatur dan manual resmi terkait.

2.1 Simulasi Aerodinamika Menggunakan Metode CFD

Analisis dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu simulasi aerodinamika menggunakan CFD dan pemodelan BOK menggunakan HDM-4. Pada tahap pertama, dikembangkan lima model truk 3D yang merepresentasikan berbagai kondisi muatan, mulai dari 8 hingga 12 ton. Setiap model divalidasi di SolidWorks dan digunakan untuk menghitung luas bidang frontal (AF). Simulasi CFD kemudian dilakukan melalui tiga langkah, yaitu *pre-processing* (pemodelan 3D dan pembuatan mesh), *processing* (penentuan jenis fluida, kecepatan aliran, serta kondisi batas), dan *post-processing* untuk memperoleh gaya hambat aerodinamis dan koefisien hambatan (Cd).

Nilai gaya hambat dan koefisien hambatan (Cd) yang dihasilkan dari simulasi CFD selanjutnya digunakan sebagai parameter utama dalam proses kalibrasi model HDM-4, khususnya pada perhitungan hambatan total jalan yang berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar (Hassan et al., 2014; Lubis et al., 2020; Mirmahdi et al., 2021; Pal et al., 2015; Tillman et al., 2012). Secara fisik, nilai Cd dipengaruhi oleh bentuk bodi kendaraan, kecepatan, luas bidang frontal, dan densitas udara. Dalam penelitian ini, nilai Cd dihitung menggunakan algoritma boundary di SolidWorks, mengikuti pendekatan yang telah digunakan pada studi-studi sebelumnya. Gaya hambat aerodinamis kemudian dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$Cd = \frac{2 FA}{\rho V^2 AF} \quad (1)$$

dengan FA adalah gaya hambat aerodinamis dalam satuan Newton (N), Cd merupakan koefisien hambatan, ρ adalah densitas udara dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3), AF menyatakan luas bidang frontal kendaraan dalam meter persegi (m^2), dan V adalah kecepatan kendaraan dalam meter per detik (m/s).

2.2 Model Biaya Operasi Kendaraan HDM-4

Penelitian ini menggunakan model HDM-4 Level II untuk mengestimasi komponen utama BOK, yang meliputi konsumsi bahan bakar, pelumas, dan ban, dengan parameter masukan yang dikalibrasi menggunakan keluaran dari simulasi CFD (Odoki & Kerali, 2006). Proses

kalibrasi difokuskan pada karakteristik aerodinamika guna merepresentasikan konfigurasi truk dengan kelebihan beban dan dimensi muatan yang lazim digunakan dalam operasi angkutan batubara di Indonesia.

Hambatan total yang bekerja pada kendaraan dihitung sebagai penjumlahan hambatan aerodinamis, hambatan kelandaian, hambatan gelinding, dan hambatan kelengkungan, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2).

$$FTR = FA + FG + FR + FCV \quad (2)$$

dengan FTR adalah hambatan total (N), FA adalah hambatan aerodinamis, FG adalah hambatan kelandaian, FR adalah hambatan gelinding, dan FCV adalah hambatan kelengkungan.

Perhitungan hambatan aerodinamis (FA) mengikuti Persamaan (3):

$$FA = 0.5 \times RH0 \times CDMult \times CD \times AF \times V^2 \quad (3)$$

dengan RH0 menyatakan densitas udara dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3), CDMult adalah faktor pengali koefisien hambatan, C_D merupakan koefisien hambatan, AF adalah luas bidang frontal kendaraan dalam meter persegi (m^2), dan V adalah kecepatan kendaraan dalam meter per detik (m/s).

Hambatan kelandaian (F_G) merupakan komponen berat kendaraan yang bekerja melawan atau membantu pergerakan akibat kemiringan jalan, yang dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$FG = WGT_OPER \times g \times GR \quad (4)$$

dengan WGT_OPER adalah berat operasi total kendaraan dalam kilogram (kg), g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), dan GR menyatakan kelandaian jalan rata-rata (positif untuk tanjakan dan negatif untuk turunan).

Hambatan gelinding (FR) dan hambatan kelengkungan FCV dihitung mengikuti pedoman HDM-4 dengan memasukkan penyesuaian terhadap kekakuan ban, jari-jari tikungan, dan superelevasi. Parameter-parameter tersebut dilokalkan menggunakan data lapangan untuk merepresentasikan kondisi jalan dan kendaraan di Indonesia. Konsumsi bahan bakar diestimasi berdasarkan total daya traksi (PTOT) yang dikoreksi dengan koefisien efisiensi konversi energi bahan bakar (ZETA). Konsumsi pelumas diestimasi menggunakan laju kontaminasi oli

(OILCONT), sedangkan keausan ban dihitung berdasarkan energi tangensial yang mencakup gaya sirkumferensial, lateral, dan normal (Odoki & Kerali, 2006). Seluruh parameter model dikalibrasi untuk mencerminkan pengaruh iklim tropis, pola muatan truk, serta gangguan aerodinamika yang khas pada kendaraan angkutan batubara di Provinsi Jambi.

2.2.1 Model Konsumsi Bahan Bakar

Model konsumsi bahan bakar HDM-4 mengestimasi penggunaan bahan bakar berdasarkan total daya mesin yang dibutuhkan untuk mengatasi hambatan gerak kendaraan serta untuk mendukung fungsi-fungsi bantu mesin. Estimasi ini mempertimbangkan hambatan aerodinamis, hambatan gelinding, pengaruh kelandaian, dan ketidakefisienan mekanis. Total daya mesin yang dibutuhkan pada kondisi *steady-state*, yang dinyatakan sebagai PTOT, dihitung sebagai penjumlahan antara daya traksi dan daya yang digunakan oleh aksesoris mesin, yang telah dikoreksi terhadap efisiensi sistem *drivetrain* (Odoki & Kerali, 2006), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$PTOT = \left(\frac{PTR}{EDT} + PENGACCS \right) \quad (5)$$

dengan PTR adalah daya traksi (kW), EDT adalah efisiensi drivetrain, dan PENGACCS adalah beban aksesoris mesin (kW).

Daya traksi PTR, yang merepresentasikan energi untuk mengatasi hambatan total jalan, dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$PTR = \frac{FTR \times V}{1000} \quad (6)$$

dengan FTR adalah tahanan total jalan (N) dan V adalah kecepatan kendaraan dalam meter per detik (m/s).

Konsumsi bahan bakar sesaat (*instantaneous fuel consumption*, IFC), yang dinyatakan dalam mililiter per detik (ml/s), dihitung menggunakan Persamaan (7).

$$IFC = \max [ID_F, ZETA \times PTOT \times (1 + dFUEL)] \quad (7)$$

dengan ID_F adalah konsumsi bahan bakar saat idle (ml/s), ZETA adalah faktor efisiensi konversi energi bahan bakar terhadap daya, dan dFUEL merepresentasikan variasi beban operasional.

Keluaran akhir model konsumsi bahan bakar adalah konsumsi bahan bakar spesifik (FC), yang menyatakan jumlah bahan bakar per

kilometer perjalanan. Nilai ini diperoleh dengan membagi konsumsi bahan bakar sesaat dengan kecepatan kendaraan, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (8).

$$FC = \frac{IFC}{v} \quad (8)$$

dengan FC dinyatakan dalam mililiter per kilometer.

2.2.2 Model Konsumsi Pelumas

Dalam HDM-4, konsumsi pelumas mesin diestimasi sebagai penjumlahan antara kehilangan akibat kontaminasi dan kehilangan akibat penggunaan operasional. Total konsumsi pelumas per kilometer, yang dinyatakan sebagai OIL (Odoki & Kerali, 2006), dihitung menggunakan Persamaan (9).

$$OIL = OILCONT + OIOPER \times FC \quad (9)$$

dengan OIL adalah konsumsi pelumas total (liter/kendaraan-km), OILCONT adalah kehilangan pelumas akibat kontaminasi (liter/kendaraan-km), OIOPER adalah faktor kehilangan pelumas akibat operasi (liter per liter bahan bakar), dan FC adalah konsumsi bahan bakar spesifik (liter/kendaraan-km).

Kehilangan pelumas akibat kontaminasi (OILCONT) ditentukan berdasarkan rasio antara kapasitas oli mesin dan interval penggantian oli, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (10).

$$OILCONT = \frac{OILCAP}{DISTCHNG} \quad (10)$$

dengan OILCAP adalah kapasitas oli mesin (liter) dan DISTCHNG adalah jarak tempuh antar penggantian oli (km).

2.2.3 Model Konsumsi Ban

Model konsumsi ban dalam HDM-4 didasarkan pada prinsip energi slip, yang mana keausan ban dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja pada ban selama kendaraan bergerak, yaitu gaya sirkumferensial, lateral, dan normal. Gaya-gaya ini dikonversi menjadi energi ban (*tyre energy*, TE), yang menjadi dasar dalam estimasi keausan tapak ban. Energi ban per roda dihitung sebagai fungsi dari gaya lateral dan sirkumferensial relatif terhadap beban normal (Odoki & Kerali, 2006), sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (11).

$$TE = \frac{(CFT^2 + LFT^2)}{NFT} \quad (11)$$

dengan TE adalah energi ban (J·m), CFT adalah gaya sirkumferensial (N), LFT adalah gaya lateral (N), dan NFT adalah gaya normal (N).

Gaya sirkumferensial pada ban diperoleh dengan mendistribusikan tahanan total jalan ke seluruh roda dan disesuaikan untuk merepresentasikan pengaruh kemacetan lalu lintas melalui faktor peningkatan konsumsi bahan bakar. Gaya lateral dihitung berdasarkan tahanan kendaraan terhadap kelengkungan jalan, yang juga didistribusikan merata pada setiap roda. Sementara itu, gaya normal merupakan beban vertikal yang ditopang oleh setiap ban, yang diperoleh dengan membagi berat operasi total kendaraan terhadap jumlah roda. Ketiga komponen gaya ini menjadi masukan utama dalam perhitungan energi ban, yang merupakan parameter kunci dalam model konsumsi ban HDM-4.

Laju keausan tapak ban (*tread wear rate*, TWT), yang menyatakan volume ban yang hilang per satuan jarak, dihitung dari energi ban menggunakan Persamaan (12).

$$TWT = C0tc + Ctcte \times TE \quad (12)$$

dengan C0tc adalah konstanta dan Ctcte adalah koefisien keausan tapak ban (dm³/J·m).

Konsumsi ban per kilometer kendaraan kemudian diestimasi dengan mengalikan jumlah ban baru ekuivalen per 1.000 kendaraan-km per roda (EQNT) dengan jumlah roda dan disesuaikan menggunakan faktor modifikasi, sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (13).

$$TC = \frac{EQNT \times NUM_WHEELS}{MODFAC} \quad (13)$$

dengan MODFAC adalah faktor modifikasi umur pakai ban.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan truk Mitsubishi Colt Diesel dengan konfigurasi sumbu 1.2, yang merupakan tipe kendaraan paling umum digunakan untuk angkutan batubara di Provinsi Jambi. Dimensi kendaraan diperoleh dari distributor resmi, sedangkan dimensi bak muatan mengikuti spesifikasi yang ditetapkan dalam Surat Edaran Direktorat Jenderal Perhubungan Darat Nomor AJ.307/2/7/DRJD/2003 tentang angkutan barang curah (Direktorat Perhubungan Darat, 2003). Truk ini memiliki panjang 5.960

mm dan lebar 1.750 mm, dengan tinggi bak maksimum sebesar 700 mm tanpa dinding samping dan hingga 1.200 mm dengan dinding samping terpasang, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Profil beban dan dimensi muatan berlebih ditetapkan berdasarkan observasi langsung terhadap 60 unit truk yang beroperasi di Jalan Lingkar Barat, Jambi, sehingga data yang digunakan secara empiris merepresentasikan kondisi operasional dan praktik pemuatan aktual. Analisis dimensi muatan berlebih dilakukan dengan mengonversi berat muatan menjadi volume menggunakan densitas batubara lignit yang umum dijumpai di Provinsi Jambi, yaitu sebesar 1,28 g/cm³ (Suhada et al., 2015). Berat kosong truk umumnya sekitar 4 ton, dan muatan hingga 8 ton masih berada dalam dimensi bak standar.

Untuk muatan standar sebesar 8 ton, volume yang bersesuaian adalah 6.250.000 cm³. Ketika membawa muatan 9 ton (8 + 1), volumenya meningkat menjadi 7.031.250 cm³, yang menyebabkan kenaikan tinggi muatan sebesar 0,20 cm. Pada muatan 10 ton (8 + 2), volume bertambah menjadi 7.812.500 cm³ dengan peningkatan tinggi sebesar 11,1 cm. Muatan 11 ton (8 + 3) menghasilkan volume sebesar 8.593.750 cm³ yang setara dengan kenaikan tinggi 22,4 cm. Pada muatan 12 ton (8 + 4), volume mencapai 9.375.000 cm³, yang berarti terjadi overdimension sebesar 3.125.000 cm³ dan total kenaikan tinggi muatan sebesar 33,5 cm. Seiring meningkatnya muatan, tingkat kelebihan dimensi di atas kapasitas bak standar menjadi semakin besar, yang berdampak pada peningkatan luas area frontal dan gaya hambat aerodinamis. Konfigurasi dimensi untuk setiap skenario muatan ditunjukkan pada **Gambar 2**.

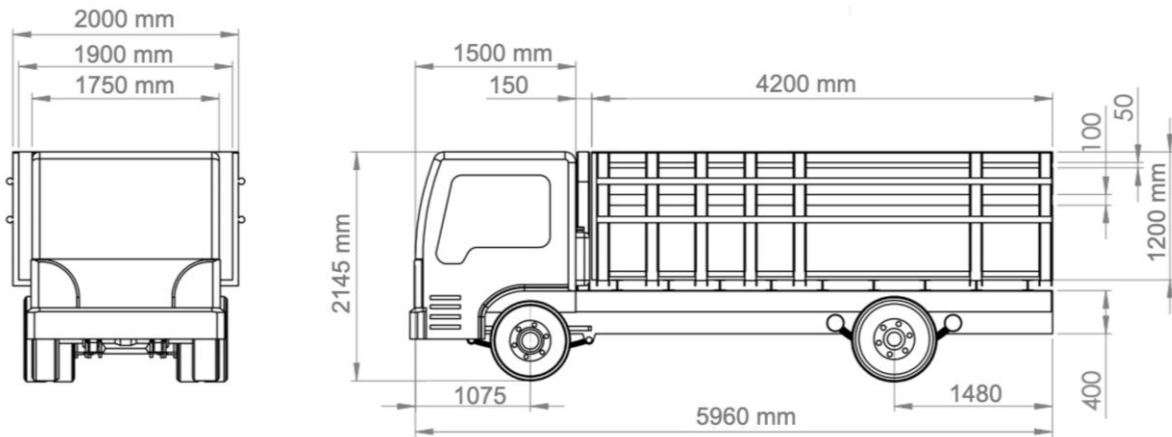
Seiring dengan meningkatnya muatan truk, volume muatan bertambah dan menyebabkan perluasan luas area frontal kendaraan. Hasil pemodelan menggunakan SolidWorks menunjukkan bahwa luas area frontal meningkat secara bertahap dari 4,08 m² pada muatan standar 8 ton menjadi 4,69 m² pada muatan 12 ton (8+4). Peningkatan luas area frontal tersebut diikuti oleh kenaikan koefisien hambatan (Cd) dari 0,73 menjadi 0,87, yang mengindikasikan penurunan efisiensi aerodinamika akibat perubahan geometri

kendaraan. Perilaku ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan dimensi kargo dan perubahan geometri kendaraan angkutan barang secara signifikan memperbesar luas bidang frontal dan koefisien hambatan, sehingga menurunkan efisiensi aerodinamika kendaraan (Bayındırlı et al., 2016; Chowdhury et al., 2019). Ringkasan hasil simulasi aerodinamika untuk seluruh skenario muatan, meliputi variasi luas area frontal dan nilai Cd, disajikan secara kuantitatif pada **Tabel 1**.

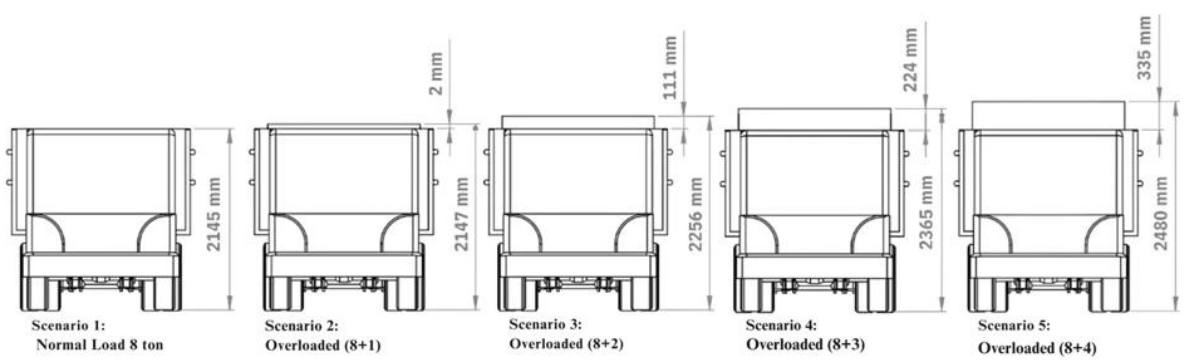
Tabel 1. Hasil Simulasi Aerodinamika

Skenario dan Berat Muatan (ton)	Luas Area Frontal (m ²)	Cd
Muatan Normal (8)	4,08	0,73
<i>Overloaded</i> (8+1)	4,20	0,74
<i>Overloaded</i> (8+2)	4,29	0,77
<i>Overloaded</i> (8+3)	4,48	0,82
<i>Overloaded</i> (8+4)	4,69	0,87

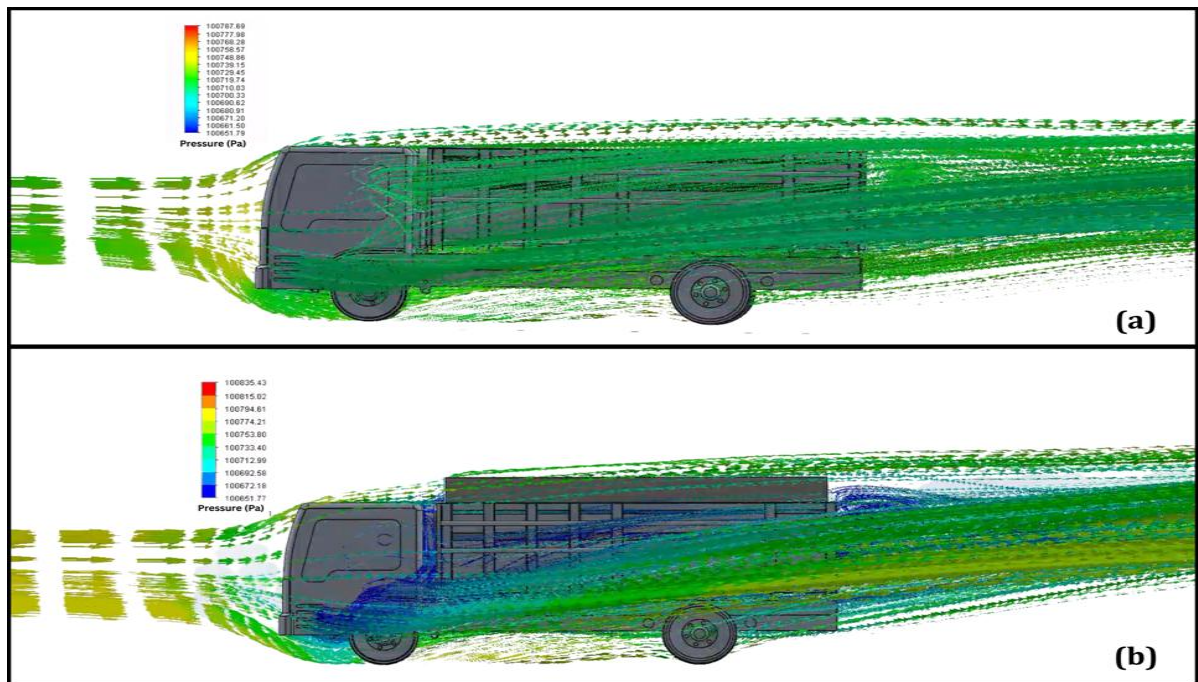
Selain perubahan parameter aerodinamika, simulasi juga menunjukkan peningkatan gaya hambat aerodinamis seiring bertambahnya muatan pada rentang kecepatan operasi 28–32 km/jam. Untuk muatan standar 8 ton, gaya hambat aerodinamis berada pada kisaran 102,78–135,18 N, sedangkan pada kondisi muatan 12 ton (8+4) meningkat menjadi 142,43–185,76 N. Secara rata-rata, gaya hambat aerodinamis meningkat hingga 37,9% dibandingkan kondisi muatan standar. Peningkatan gaya hambat aerodinamis akibat perubahan dimensi muatan mengindikasikan dominasi pressure drag yang dipicu oleh separasi aliran dan pembentukan zona tekanan rendah di bagian belakang kendaraan. Mekanisme ini sejalan dengan prinsip aerodinamika kendaraan berat yang menunjukkan bahwa perubahan geometri bodi secara signifikan memengaruhi distribusi tekanan, gaya hambat, dan kebutuhan energi kendaraan (Delgado et al., 2017; Mirmahdi et al., 2021).



Gambar 1. Dimensi Kendaraan dan Bak Muatan Truk.



Gambar 2. Skenario Konfigurasi Dimensi Truk Berdasarkan Variasi Muatan.



Gambar 3. Perbandingan Pola Aliran dan Distribusi Tekanan Aerodinamis dengan (a) Muatan Normal 8 Ton, dan (b) Muatan *Overloaded* 12 Ton Berdasarkan Simulasi CFD.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Gaya Hambat, Daya Mesin, dan Konsumsi Komponen BOK

Skenario dan Berat Muatan (ton)	FA (N)	FR (N)	FG menanjak (N)	FG menurun (N)	FCV (N)	Ptot (kW)	FC (l/km)	OIL (l/km)	TC (%/km)
Muatan Normal (8)	200,03	1199,44	353,66	-245,11	57,03	46,26	0,60	0,0020013	0,31
Overloaded (8+1)	206,21	1279,10	383,13	-265,53	69,93	46,98	0,61	0,0020013	0,32
Overloaded (8+2)	211,86	1358,76	412,60	-285,96	85,83	47,70	0,63	0,0020013	0,32
Overloaded (8+3)	232,69	1438,41	442,07	-306,38	105,70	48,59	0,65	0,0020014	0,32
Overloaded (8+4)	252,69	1518,08	471,54	-326,81	131,03	49,49	0,67	0,0020014	0,33

Tabel 3. Besar Komponen dan Kenaikan BOK pada Berbagai Skenario Muatan

Skenario dan Berat Muatan (ton)	Komponen Biaya Operasi Kendaraan (BOK)					
	Biaya BBM (Rp./kend-km)	Kenaikan Biaya BBM (%)	Biaya Pelumas (Rp./kend-km)	Kenaikan Biaya Pelumas (%)	Biaya Ban (Rp./kend-km)	Kenaikan Biaya Ban (%)
Muatan Normal (8)	3.069,88	-	90,056	-	424,75	-
Overloaded (8+1)	3.159,98	2,93	90,058	0,002	427,96	0,76
Overloaded (8+2)	3.252,65	5,95	90,060	0,004	431,20	1,52
Overloaded (8+3)	3.359,52	9,44	90,062	0,007	435,52	2,53
Overloaded (8+4)	3.470,56	13,06	90,064	0,009	439,84	3,55

Perbedaan karakteristik aerodinamika antara kondisi muatan normal dan muatan overloaded dapat diamati secara jelas melalui visualisasi distribusi tekanan dan pola aliran udara hasil simulasi CFD. Pada kondisi muatan normal 8 ton, aliran udara relatif lebih teratur, dengan zona tekanan tinggi yang terkonsentrasi di bagian depan kabin dan aliran yang masih mampu mengikuti kontur bodi serta bak muatan hingga ke bagian belakang kendaraan. Pola ini mencerminkan separasi aliran yang terbatas dan pembentukan wake yang relatif kecil, yang merupakan karakteristik kendaraan dengan konfigurasi aerodinamika yang lebih efisien (Heisler, 2002).

Sebaliknya, pada kondisi muatan overloaded 12 ton (8+4), visualisasi menunjukkan gradien tekanan yang lebih tajam pada bagian depan dan atas bak muatan, diikuti oleh terbentuknya zona wake yang lebih luas dan turbulen di belakang kendaraan. Separasi aliran terjadi lebih awal akibat peningkatan tinggi dan volume muatan, yang menandakan dominasi *pressure drag* dibandingkan *skin friction drag*. Fenomena ini menyebabkan energi kinetik aliran udara lebih banyak terdisipasi dalam bentuk turbulensi, sehingga meningkatkan gaya hambat aerodinamis dan kebutuhan daya mesin untuk mempertahankan kecepatan operasi. Pola aliran

dan distribusi tekanan tersebut divisualisasikan secara jelas pada **Gambar 3**.

Secara keseluruhan, hasil simulasi aerodinamika ini menunjukkan bahwa pengangkutan dengan beban dan dimensi muatan berlebih menurunkan efisiensi aerodinamika kendaraan melalui peningkatan luas area frontal, koefisien hambatan, separasi aliran, dan turbulensi. Mekanisme ini sejalan dengan temuan-temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa perubahan geometri bodi kendaraan berat secara signifikan meningkatkan *pressure drag*, konsumsi energi, dan biaya operasi kendaraan (Bayındırılı et al., 2016; Chowdhury et al., 2019; Mirmahdi et al., 2021).

Jalan Lingkar Barat di Kota Jambi ditetapkan sebagai ruas jalan nasional dengan kode segmen 026.11.K. Ruas ini berfungsi sebagai koridor arteri primer dengan penampang melintang 2/2 tidak terbagi (2/2UD) dan lebar perkerasan sebesar 8,10 meter. Permukaan jalan berlapis aspal dengan nilai kekasaran terukur sebesar 3,89 m/km. Geometri jalan mencakup kelandaian tanjakan sebesar 2,8% dan turunan sebesar -2,9%, yang keduanya memengaruhi kinerja operasional truk berat, khususnya pada saat menanjak dan pada fase pengereman.

Survei *moving car observer* terhadap 60 truk batubara pada segmen ini menunjukkan kecepatan operasi rata-rata sebesar 28,4 hingga 35,8 km/jam, dengan variasi muatan (*payload*) 4 hingga 12 ton. Rentang tersebut merepresentasikan kondisi dari mendekati standar hingga *overload* progresif, yang secara empiris berkorelasi dengan peningkatan berat bruto kendaraan dan penurunan kecepatan operasi.

Model regresi linier berdasarkan hasil pengamatan tersebut menunjukkan korelasi negatif yang kuat antara berat muatan dan kecepatan kendaraan, yang dinyatakan dengan persamaan $y = -0,4168x + 36,791$ dan koefisien determinasi $R^2 = 0,8047$. Temuan ini mengonfirmasi bahwa peningkatan muatan berasosiasi dengan penurunan kecepatan kendaraan, sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan hubungan linier antara berat truk dan kecepatan (Setiawan & Tjahjono, 2020).

Analisis kebutuhan daya mesin dilakukan berdasarkan variasi muatan dan rasio daya terhadap berat (*Power-to-Weight Ratio*, PWR). Untuk muatan standar 8 ton, daya mesin yang dibutuhkan sebesar 46,25 kW (setara dengan 62,02 hp), sehingga diperoleh PWR sebesar 5,17 hp/ton. Setiap penambahan muatan 1 ton meningkatkan kebutuhan daya mesin sekitar 0,81 kW (1,09 hp). Pada muatan 12 ton (8 + 4), kebutuhan daya mesin mencapai 49,49 kW (66,37 hp), sementara nilai PWR turun menjadi 4,15 hp/ton, yang menunjukkan penurunan efisiensi kinerja pada kondisi *overloading*.

Konsumsi bahan bakar juga meningkat seiring bertambahnya muatan. Pada muatan 8 ton, konsumsi bahan bakar tercatat sebesar 0,60 liter per kendaraan-kilometer, atau setara dengan 1,67 km/liter. Pada muatan 12 ton, konsumsi meningkat menjadi 0,67 liter per kendaraan-kilometer, sehingga efisiensi menurun menjadi 1,48 km/liter. Pola serupa juga terlihat pada konsumsi oli mesin. Pada muatan 8 ton, konsumsi oli sebesar $2,0013 \times 10^{-3}$ liter/km, yang setara dengan sekitar 20,013 kali penggantian oli per tahun berdasarkan jarak tempuh tahunan 100.000 km. Pada muatan 12 ton, konsumsi oli meningkat menjadi $2,0014 \times 10^{-3}$ liter/km, dengan frekuensi penggantian sekitar 20,014 kali per tahun.

Keausan tapak ban juga meningkat pada muatan yang lebih besar. Pada muatan 8 ton, laju keausan tercatat sebesar 0,315% per kendaraan-kilometer, dan meningkat menjadi 0,326% pada muatan 12 ton. Peningkatan ini mencerminkan percepatan degradasi ban akibat gaya gesek dan tekanan yang lebih tinggi serta melampaui batas desain. Hasil-hasil ini menegaskan implikasi operasional dan pemeliharaan yang signifikan dari praktik *overloading*. Ringkasan lengkap hasil analisis disajikan pada **Tabel 2**.

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan muatan dari kondisi standar 8 ton menuju skenario *overload* progresif (8+1) hingga (8+4) secara konsisten meningkatkan biaya operasional kendaraan. Pada kondisi dasar 8 ton, biaya bahan bakar tercatat sebesar Rp 3.069,88/kend-km, diikuti oleh biaya ban sebesar Rp 424,75/kend-km dan biaya pelumas sebesar Rp 90,056/kend-km. Struktur ini menegaskan bahwa bahan bakar merupakan komponen utama dalam pembentukan BOK.

Ketika muatan meningkat menjadi (8+1) atau 9 ton, biaya bahan bakar langsung naik sebesar 2,93%, sedangkan biaya ban meningkat 0,76% dan pelumas hanya 0,002%. Meskipun kenaikannya tampak kecil pada tahap awal, temuan ini menunjukkan bahwa tambahan beban 1 ton saja sudah berdampak terhadap kebutuhan energi kendaraan. Secara operasional, peningkatan ini dapat dijelaskan oleh bertambahnya gaya yang harus diatasi mesin akibat kenaikan massa dan resistansi gelinding.

Pada skenario (8+2) atau 10 ton, kenaikan biaya bahan bakar mencapai 5,95%, hampir dua kali lipat dibandingkan (8+1). Pola ini memperlihatkan bahwa pertumbuhan biaya mulai menunjukkan kecenderungan yang tidak sepenuhnya linear. Dengan bertambahnya muatan, tidak hanya berat kendaraan yang meningkat, tetapi juga konfigurasi muatan yang memperbesar hambatan aerodinamis, sebagaimana ditunjukkan oleh peningkatan nilai Cd dan luas area frontal pada hasil simulasi CFD.

Ketika muatan mencapai (8+3) atau 11 ton, biaya bahan bakar meningkat hingga 9,44%, sementara biaya ban naik 2,53%. Pada tahap ini, laju kenaikan biaya menjadi semakin nyata. Kombinasi antara peningkatan massa dan penalti aerodinamis mulai berkontribusi secara lebih dominan terhadap kebutuhan daya mesin.

Pada kondisi tertinggi yang dianalisis, yaitu (8+4) atau 12 ton, biaya bahan bakar melonjak sebesar 13,06%, sedangkan biaya ban meningkat 3,55% dan pelumas tetap relatif tidak sensitif (<0,01%). Besarnya kenaikan pada skenario ini menunjukkan bahwa tambahan muatan tidak lagi memberikan peningkatan kapasitas angkut yang sebanding dengan biaya energi yang harus dikeluarkan.

Secara keseluruhan, pola dari (8+1) hingga (8+4) menunjukkan bahwa semakin besar overload, semakin besar pula penalti energi yang harus ditanggung. Dengan demikian, meskipun *overload* dapat meningkatkan kapasitas angkut dalam jangka pendek, biaya operasional per kilometer justru meningkat secara progresif. Kondisi ini menegaskan bahwa praktik *overload* berpotensi mengurangi efisiensi ekonomi apabila dihitung berdasarkan biaya aktual per kendaraan-kilometer. Rincian kuantitatif dampak tersebut disajikan dalam **Tabel 3**.

Temuan ini diperkuat oleh berbagai studi yang menunjukkan bahwa praktik *overloading* secara langsung meningkatkan konsumsi bahan bakar, keausan ban, dan biaya operasi kendaraan. Selain membebani mesin dan menurunkan stabilitas kendaraan, muatan berlebih juga memperpanjang jarak pengereman dan mempercepat keausan mekanis, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan dan biaya pemeliharaan (Shah et al., 2016). Di Indonesia, praktik *overloading* terbukti secara signifikan meningkatkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasi kendaraan dibandingkan dengan kondisi muatan normal (Setiawan & Tjahjono, 2020).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa praktik pengangkutan dengan beban dan dimensi muatan berlebih pada truk bak terbuka secara terukur mengubah karakteristik aerodinamika kendaraan dan secara langsung meningkatkan Biaya Operasi Kendaraan (BOK). Integrasi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan kalibrasi model HDM-4 Level II menunjukkan bahwa peningkatan muatan dari 8 menjadi 12 ton tidak hanya menambah massa kendaraan, tetapi juga memperbesar luas bidang frontal dari 4,08 menjadi 4,69 m² serta menaikkan koefisien hambatan (Cd) dari 0,73 menjadi 0,87. Perubahan geometri ini meningkatkan hambatan aerodinamis dan

kebutuhan daya mesin, yang pada akhirnya menaikkan konsumsi bahan bakar sebesar 11,67%, meningkatkan keausan ban sebesar 6,45%, dan memberikan kenaikan marginal pada konsumsi pelumas.

Dari perspektif ekonomi, peningkatan konsumsi energi tersebut terkonversi menjadi kenaikan biaya bahan bakar sebesar 13,06% dan biaya ban sebesar 3,55% pada kondisi muatan maksimum (8+4), sementara biaya pelumas relatif tidak sensitif terhadap variasi muatan dalam rentang analisis. Pola kenaikan biaya menunjukkan karakter progresif dan tidak sepenuhnya linear, yang mengindikasikan adanya akumulasi penalti energi akibat kombinasi peningkatan massa dan perubahan aerodinamika. Dengan demikian, strategi *overload* yang bertujuan meningkatkan kapasitas angkut jangka pendek berpotensi menghasilkan peningkatan biaya operasional yang lebih cepat dibandingkan manfaat tambahan muatan per perjalanan.

Kontribusi ilmiah utama penelitian ini terletak pada integrasi parameter aerodinamika aktual (AF dan Cd) hasil simulasi CFD ke dalam kalibrasi HDM-4 Level II, sehingga estimasi BOK menjadi lebih sensitif terhadap perubahan konfigurasi muatan dibandingkan penggunaan parameter default. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan parameter baku tanpa penyesuaian geometri berisiko menghasilkan *underestimation* terhadap biaya operasional pada kondisi *overload*.

Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu belum dilakukannya validasi eksperimental melalui *wind tunnel* atau pengukuran lapangan langsung, serta cakupan analisis yang terbatas pada satu koridor, satu tipe kendaraan, dan satu komoditas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan simulasi numerik dengan data telematika operasional dan pengujian empiris guna meningkatkan robustitas model. Dari sisi kebijakan, penerapan sistem *Weigh-in-Motion*, penguatan penegakan batas muatan, serta penyesuaian struktur biaya angkutan berdasarkan BOK aktual menjadi langkah strategis untuk menekan pemborosan energi, memperpanjang umur infrastruktur, dan meningkatkan keselamatan transportasi barang secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifaini, I. A., & Soeskandi, H. (2022). Analisis Hukum Kebijakan Kelebihan Dimensi dan Kelebihan Muatan Terhadap Demonstran Gerakan sopir Jawa Timur. *Bureaucracy Journal: Indonesia Journal of Law and Social-Political Governance*, 2(3), 985–1002. <https://doi.org/10.53363/bureau.v2i3.77>
- Bayındırlı, C., Akansu, Y. E., & Salman, M. S. (2016). The Determination Of Aerodynamic Drag Coefficient Of Truck and Trailer Model By Wind Tunnel Tests. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 5(2), 53. <https://doi.org/10.18245/ijaet.11754>
- Bennett, C. R., & Paterson, W. D. O. (2000). *A Guide to Calibration and Adaptation. Highway Development and Management Series (1st ed., Vol. 5)*. The World Road Association (PIARC).
- Brasukra, S., & Hergesel, A. (2008). Biaya transportasi barang angkutan, regulasi, dan pungutan jalan di Indonesia. Asia Foundation. https://supplychainindonesia.com/wp-content/files/Biaya_Transportasi_Barang_Asia_Foundation_tanpa_peta_LAIN_LAIN.pdf
- Budiharjo, A., Andika, T., Fitriani, N., Rukman, R., & Turasno, B. (2022). Operational Data Analytics of Over Dimensional and Overloaded Truck in Indonesia. *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 2(2), 88–98. <https://doi.org/10.31098/cset.v2i2.562>
- Carson, J. L. (2011). *Directory of Significant Truck Size and Weight Research, NCHRP 20-07 Task 303*. [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07\(303\)_FR.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(303)_FR.pdf)
- Chan, Y. C. (2008). *Truck Overloading Study in Developing Countries and Strategies to Minimize its Impact [Queensland University of Technology]*. In *Engineering, Environmental Science*. https://eprints.qut.edu.au/28561/1/Ying_Chan_Thesis.pdf
- Chen, Y., Wang, K., Zhang, Y., Luo, R., Yu, S., Shi, Q., & Hu, W. (2020). Investigating factors affecting road freight overloading through the integrated use of BLR and CART: A case study in China. *Transport*, 35(3), 236–246. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12635>
- Chowdhury, H., Juwono, R., Zaid, M., Islam, R., Loganathan, B., & Alam, F. (2019). An experimental study on of the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent. *Energy Procedia*, 160, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.115>
- de Saxe, C. C., van Eeden, J., Kemp, L., Steenkamp, A., & Cowper, J. (2023). High-capacity coal trucks to reduce costs and emissions at South Africa’s power utility. *Research in Transportation Business and Management*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100898>
- Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2017). Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020-2030 Time Frame. <https://theicct.org>
- Direktorat Perhubungan Darat. (2003). *Surat Edaran Dirjen Hubdat No. AJ.307/2/7/DRJD/2003, tentang Ketentuan Mengenai Angkutan Barang Curah*.
- Harun, S. S., Jinca, M. Y., & Saleng, A. (2024). Vehicle Traffic with Over Dimensions and Over Loads in Improving Transportation Safety. *Civil Engineering and Architecture*, 12(6), 3933–3943. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120613>
- Hassan, R. S. M., Islam, T., Ali, M., & Islam, Q. M. (2014). Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars. *Procedia Engineering*, 90, 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.854>
- Heisler, H. (2002). *Advanced Vehicle Technology (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann.
- Jacob, B., & Feypell-de La Beaumelle, V. (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, 34(1), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2010.06.003>

- Jiao, X., & Bienvenu, M. (2015). Field Measurement and Calibration of HDM-4 Fuel Consumption Model on Interstate Highway in Florida. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 4(1), 29–46. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.4.1.29>
- Jihanny, J., Subagio, B. S., & Hariyadi, E. S. (2018). The analysis of overloaded trucks in indonesia based on weigh in motion data (east of sumatera national road case study). *MATEC Web Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814702006>
- Kadarsa, E., Hanafiah, Adhitya, B. B., Pataras, M., & Azari, A. (2019). Comparison Analysis Operastional Cost of Vehicle (VOC) between Kayu Agung-Palembang-Betung Toll Road Plan with Existing Road. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 396(1), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/396/1/012034>
- Karim, M. R., Abdullah, A. S., Yamanaka, H., Abdullah, A. S., & Ramli, R. (2013). Degree of Vehicle Overloading and its Implication on Road Safety in Developing Countries. *Civil and Environmental Research*, 3(12), 20–32. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/CER/article/view/8636/8832>
- Ko, K. H., Moon, B. K., Lee, T. W., Lee, W. H., Yoo, I. Y., Lee, S. Y., Han, D. S., & Jeong, S. H. (2016). An Economic Calibration Method for Fuel Consumption Model in HDM4. *Wireless Personal Communications*, 89(3), 959–975. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3353-2>
- Li, J., Zhou, J., & Hu, Z. (2008, October 8). Safety Analysis of Overloaded Truck for Transportation. *Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China: Proceedings of the Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*. [https://doi.org/doi.org/10.1061/40996\(330\)595](https://doi.org/doi.org/10.1061/40996(330)595)
- Liputantanjab. (2021, November 11). Wadirlantas Polda Jambi: Untuk Sopir Truk Batubara Harus Dilengkapi Surat-surat dan Muatan Jangan Melebihi Tonase. *Liputantanjab.Com*. <https://liputantanjab.com/wadir-lantas-polda-jambi-untuk-sopir-truk-batubara-harus-lengkapi-surat-surat-dan-muatan-jangan-melebihi-tonase/>
- Lubis, S., Siregar, C. A., & Abdilah, F. (2020). Simulation of Air Flow Loss in Triangle Pipe Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 821(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/821/1/012047>
- Mirmahdi, E., Karimi, M. H., Khoubrou, A., & Sajed, S. A. (2021). The Effect of Aerodynamic Forces on Automotive Design and Reducing Fuel Consumption. *International Journal of Robotics and Automation*, 7(1), 36–41. <https://doi.org/10.37628/IJRA>
- Nariendra, P. W., & Juanita, J. (2023). Implementasi Kebijakan Operasional Truk Overloading Di Provinsi Jambi. 24(1), 59–64. <https://doi.org/10.30595/techno.v24i1.17213>
- Nariendra, P. W., & Lestiani, M. E. (2025). Calibration of HDM-4 Model for Fuel Consumption in Heavy-Duty Trucks: Integration of Telematics, Engine Speed, and Aerodynamics. *Automotive Experiences*, 8(1), 109–121. <https://doi.org/10.31603/ae.12862>
- Nariendra, P. W., Santosa, W., & Sutandi, A. C. (2026). Modeling Fuel Consumption of Heavy-duty Trucks Using Telematics Data. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 54, 41–48. <https://doi.org/10.3311/pptr.38337>
- NZ Transport Agency. (2017). Overdimension Vehicles and Loads. www.nzta.govt.nz/traffic/current-conditions/index.html.
- Odoki, J. B., & Kerali, H. G. R. (2006). Analytical Framework and Model Descriptions. *Highway Development and Management Series (2nd ed., Vol. 4)*. World Road Association PIARC.
- Pal, S., Kabir, S. M. H., & Talukder, M. M. M. (2015). Aerodynamic Analysis Of A Concept Car Model. *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015*.
- Pemerintah Provinsi Jambi. (2021). Surat Edaran Gubernur Jambi Nomor 1448/SE/DISHUB-

- 3.1/XII/2021 tentang penggunaan jalan publik untuk angkutan Batubara antar Kabupaten/Kota dalam Provinsi Jambi. In Pemerintah Provinsi Jambi (1448/SE/DISHUB-3.1/XII/2021).
- Perrotta, F., Parry, T., Neves, L. C., Buckland, T., Benbow, E., & Mesgarpour, M. (2019). Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a Big data approach: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.001>
- Posada-Henao, J. J., Sarmiento-Ordosgoitia, I., & Correa-Espinal, A. A. (2023). Effects of Road Slope and Vehicle Weight on Truck Fuel Consumption. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su15010724>
- Santoso, B. (2022, January 17). Dua Kecelakaan Maut Di Jalur Lintas Sumatera Jambi, Enam Orang Tewas. *Suara.Com*. <https://www.suara.com/news/2022/01/17/055722/dua-kecelakaan-maut-di-jalur-lintas-sumatera-jambi-enam-orang-tewas>
- Setiawan, D., & Tjahjono, T. (2020). Overloading Vehicle Impact Analysis on the Performance of Toll Road Traffic. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4828–4833. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/121882020>
- Shah, R., Sharma, Y., Mathew, B., Kateshiya, V., Parmar, J., & Prof, A. (2016). Review Paper on Overloading Effect. *International Journal of Advanced Scientific Research and Management*, 1(4), 131–134. https://ijasrm.com/wp-content/uploads/2016/04/IJASRM_V1S4_039_131_134.pdf
- Simanjuntak, G. I., Pramusetyo, A., Riyanto, B., & Supriyono. (2014). Analisis Pengaruh Muatan Lebih (Overloading) Terhadap Kinerja Jalan Dan Umur Rencana Perkerasan Lentur (Studi Kasus Ruas Jalan Raya Pringsurat, Ambarawa-Magelang). *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 3(3), 539–551. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkts/article/view/5772>
- Subhan, A. (2015). Jejaring Kebijakan Pengangkutan Batubara di Provinsi Jambi ditinjau dari Perspektif Good Governance. *Jurnal Ilmu Pemerintahan*, 1(1), 86–104. <https://doi.org/doi.org/10.24198/cosmogo.v1i1.11801>
- Suhada, I. D., Triono, U., Priyono, & R, R. M. (2015). Penyelidikan Batubara Daerah Batusawar dan Sekitarnya, Kabupaten Tebo dan Batanghari, Provinsi Jambi. https://geologi.esdm.go.id/perpustakaan/?p=show_detail&id=2530&keywords=
- Suwandi. (2022, January 22). Hilang Kendali, Truk Tronton Muatan Batubara Hantam Mobil Pikap di Jambi, 11 Penumpang Luka. *Kompas.Com*. <https://regional.kompas.com/read/2022/01/22/082713378/hilang-kendali-truk-tronton-muatan-batubara-hantam-mobil-pikap-di-jambi-11>
- Tillman, D. A., Duong, D. N. B., & Harding, N. S. (2012). *Solid Fuel Blending (Vol. 7)*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-30636-4>
- Wilches, F. J., Reyes, L. J. C., & Ávila, R. H. (2019). Effect of Type of Carried Load on Damage Factors Caused by Overloaded Trucks in a Road Section in Northern Colombia. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(12), 145–154. <http://iaeme.com/Home/journal/IJCIET145editor@iaeme.comhttp://iaeme.comhttp://iaeme.com>
- Yang, Z., Minjares, R., Kusumaningkatma, M., Sehleier, F., Herliana, L., Priatama, Y., Yani, A., Wahyudi, A., Simbolon, E., Ayu, D., & Indah, D. (2021). Truck Fleet Modernization in Indonesia Mitigation Action Outline. <https://changing-transport.org/publications/truck-fleet-modernization-in-indonesia/>
- Zaabar, I., & Chatti, K. (2010). Calibration of HDM-4 Models for Estimating the Effect of Pavement Roughness on Fuel Consumption for U.S. Conditions. *Journal of the Transportation Research Board*, 2155, 105–116. <https://doi.org/10.3141/2155-12>