

Analisis Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi CO₂ pada Truk Angkut di Operasi Tambang Terbuka¹

An Analysis of Fuel Consumption Efficiency and CO₂ Emissions in Haul Trucks at Open-Pit Mining Operations

Syamsuddin²

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar

ABSTRAK

Konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ dari truk angkut (*Haul Truck*) di operasi tambang terbuka merupakan masalah penting yang mempengaruhi efisiensi energi dan dampak lingkungan sektor pertambangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ truk angkut dalam kondisi operasional aktual di tambang terbuka, dengan fokus pada pengaruh kondisi jalan tambang, termasuk lebar jalan, tikungan, dan kemiringan. Metode penelitian melibatkan pengumpulan data empiris dari operasi truk angkut di tambang terbuka, termasuk spesifikasi truk, karakteristik jalan, dan variabel operasional. Data dianalisis dengan membandingkan kinerja bahan bakar truk terhadap jalan tambang pada tikungan dan mengevaluasi dampak kondisi jalan terhadap emisi CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jalan tambang dengan radius tikungan yang lebih kecil 15,30 m mengkonsumsi bahan bakar sebesar 100 liter/jam dan emisi CO₂ sebesar 268 Kg CO₂/liter, sedangkan pada radius tikungan yang lebar 32,03 m mengkonsumsi bahan bakar sebesar 50 liter/jam dan emisi CO₂ sebesar 134 Kg CO₂/liter menyebabkan peningkatan signifikan pada konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂. Kondisi operasional ini memaksa truk untuk melakukan akselerasi dan deselerasi berulang kali, yang mengurangi efisiensi energi. Penelitian ini menyarankan optimalisasi desain jalan tambang untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Implikasi dari penelitian ini penting bagi industri tambang, karena dengan perbaikan desain infrastruktur jalan tambang, operator dapat mengurangi konsumsi energi dan berkontribusi pada pencapaian target keberlanjutan.

Kata kunci: Tambang terbuka, konsumsi bahan bakar, emisi CO₂, efisiensi energi, desain jalan tambang.

ABSTRACT

Fuel consumption and CO₂ emissions from haul trucks in open-pit mining operations are critical issues affecting energy efficiency and the environmental impact of the mining sector. This study aims to analyze the fuel efficiency and CO₂ emissions of haul trucks under actual operational conditions in open-pit mines, focusing on the influence of mine road conditions, including road width, curvature, and gradient. The research methodology involves empirical data collection from haul truck operations in open-pit mines, including truck specifications, road characteristics, and operational variables. The data were analyzed by comparing the fuel performance of haul trucks on curved road sections and evaluating the impact of road conditions on CO₂ emissions. The results reveal that mine roads with a smaller curve radius of 15,30 meters result in a fuel consumption rate of 100 liters/hour and CO₂ emissions of 268 kg CO₂/liter, whereas roads with a larger curve radius of 32,03 meters exhibit a fuel consumption rate of 50 liters/hour and CO₂ emissions of 134 kg CO₂/liter. These findings indicate that sharper curves significantly increase fuel consumption and CO₂ emissions. Such operational conditions compel trucks to repeatedly accelerate and decelerate, thereby reducing energy efficiency. This study recommends optimizing mine road design to enhance fuel efficiency and reduce greenhouse gas emissions. The implications of this research are significant for the mining industry, as improvements in mine road infrastructure design can enable operators to lower energy consumption and contribute to achieving sustainability targets.

¹ Info Artikel: Received: 4 November 2024, Revised: 2 Desember 2024, Accepted: 9 Desember 2024, Published: 24 Desember 2024

² E-mail: svamsuddin.hamzah71@gmail.com

Keywords: Open-pit mining, fuel consumption, CO₂ emissions, energy efficiency, mine road design.

PENDAHULUAN

Konsumsi bahan bakar dan emisi karbon dioksida (CO₂) dari kendaraan berat, khususnya truk angkut (*dump truck*) di tambang terbuka, merupakan isu krusial yang mempengaruhi efisiensi energi serta keberlanjutan operasional industri pertambangan (Rodvalho et al., 2020; Wang et al., 2021). Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap perubahan iklim global, sektor tambang, sebagai salah satu kontributor emisi gas rumah kaca, menghadapi tantangan untuk mengurangi dampak lingkungannya (Masih-Tehrani et al., 2020). Truk angkut yang digunakan dalam operasi tambang terbuka adalah salah satu penyumbang utama konsumsi bahan bakar karena kebutuhan daya yang tinggi untuk mengangkut material berat dalam jarak jauh dan melalui kondisi medan yang bervariasi, seperti tikungan tajam dan jalan menanjak (Vera-Bureau et al., 2023). Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa kondisi jalan tambang, termasuk lebar jalan, radius tikungan, dan kemiringan, secara signifikan mempengaruhi efisiensi bahan bakar serta tingkat emisi kendaraan tambang (Awuah-Offei et al., 2011; Choi & Nieto, 2011).

Penelitian ini berfokus pada analisis efisiensi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ dari truk angkut dalam operasi tambang terbuka, dengan mempertimbangkan pengaruh variabel jalan tambang yang tidak sesuai dengan standar yang ditetapkan, seperti *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (*Aashto1993*, n.d.). Meskipun ada berbagai penelitian yang menyoroti hubungan antara kondisi operasional dan efisiensi energi pada kendaraan berat, literatur yang secara khusus mengkaji pengaruh spesifik dari jalan tambang di lingkungan tambang terbuka masih terbatas (Kecojevic et al., 2010; Masih-Tehrani et al., 2020). Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan menganalisis data empiris dari truk angkut yang beroperasi di kondisi jalan aktual.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor jalan tambang yang berkontribusi terhadap konsumsi bahan bakar yang tidak efisien dan emisi CO₂ yang tinggi, serta memberikan rekomendasi berbasis data untuk perbaikan desain jalan tambang (Makarova et al., 2022). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya mengurangi dampak lingkungan operasi tambang dan meningkatkan efisiensi energi di sektor pertambangan (Bodziony & Patyk, 2024).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif komparatif, dimana data operasional *dump truck* dan kondisi jalan tambang dianalisis terhadap standar AASHTO untuk menentukan apakah kondisi aktual mendukung efisiensi operasional dan keamanan (*Aashto*, 1993).

Lokasi dan Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah *dump truck* HM 400 dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

- a. Berat: 35,05 ton
- b. Tenaga mesin: 353 kW 473,381 HP
- c. Torsi maksimum: 2257 Nm
- d. Kecepatan maksimum: 70 km/jam

e. Ban: 29,5 R 25

Lokasi penelitian berfokus pada jalan angkut tambang dengan beberapa segmen, yaitu: jalan lurus, tikungan datar, superelevasi dan *grade*.

Pengumpulan Data

Data yang digunakan yaitu data primer dan sekunder. Data primer berupa hasil pengukuran kondisi aktual jalan (lebar, *grade*, *cross-slope*, superelevasi). Sedangkan data sekunder yaitu:

- a. Standar AASHTO untuk lebar jalan, superelevasi, *grade*, dan *cross-slope*.
- b. Data koefisien friksi pengereman dari literatur dan spesifikasi teknis kendaraan.

Metode Analisis Data

Metode analisis yang digunakan antara lain:

a. Analisis Kesesuaian Jalan dengan Standar AASHTO

- Lebar Jalan:
 - Bandingkan lebar jalan lurus dan tikungan dengan standar AASHTO
 - Identifikasi potensi risiko operasional akibat ketidaksesuaian lebar jalan, khususnya di area dengan tikungan sempit.
- Superelevasi:
 - Evaluasi apakah superelevasi aktual sesuai dengan standar AASHTO.
 - Hitung dampaknya terhadap stabilitas kendaraan saat bermanuver menggunakan rumus kecepatan kritis di tikungan, kecepatan rencana untuk jalan tambang peneliti ambil 60 km/jam (*WALK-AROUND 2*, n.d.)

$$V_{kritis} = \sqrt{R \cdot (g \cdot (e + f))} \quad (1)$$

dimana:

R = radius tikungan (m)

g = gravitasi (9,81 m/s²)

e = superelevasi (m/m)

f = koefisien friksi

b. Analisis Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi CO₂

- Analisis konsumsi bahan bakar berdasarkan tenaga mesin dan beban jalan (Vera-Burau et al., 2023):

$$FC = 0,3 (LF \cdot P) \quad (2)$$

dimana:

FC = konsumsi bahan bakar (liter/jam)

P = tenaga mesin (353 kW)

LF = factor beban (Vera-Burau et al., 2023)

- Emisi CO₂ Per Liter Bahan Bakar

$$Emisi CO_2 = FC \cdot 2,68 \frac{kg CO_2}{liter} \quad (3)$$

c. Keamanan Operasional

Simulasi jarak berhenti dengan menggunakan rumus berikut (*Aashto1993*,):

$$d = \frac{V}{2 \cdot f \cdot g} \tag{4}$$

dimana:

d = jarak berhenti (m)

V = kecepatan kendaraan (m/s)

f = koefisien friksi (0,28 – 0,45; menurut AASTHO)

g = gravitasi (9,81 m/s²)

d. Analisis Kemiringan dan Konsumsi Daya

Konsumsi Daya di Segmen dengan Kemiringan tinggi dihitung menggunakan:

$$P_{kemiringan} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot v \tag{5}$$

dimana:

P_{kemiringan} = daya yang dibutuhkan (W)

m = massa kendaraan (ton)

θ = sudut kemiringan jalan

v = kecepatan kendaraan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi kondisi operasional pada tambang terbuka dalam hal pengangkutan banyak factor yang mempengaruhi penggunaan bahan bakar diantaranya kondisi jalan tambang tikungan, grade, superelevasi, beban angkut, daya kerja kendaraan, factor pengemudi dan kondisi jalan terpelihara dan ban tidak terbenam dari truk angkut (Adha, 2023; Wincono et al., 2019). Pada Tabel 1, kondisi jalan pada setiap segmen sudah memenuhi standar AASTHO, kecepatan truk angkut tidak mengalami hambatan kecepatan baik yang ukuran yang sempit (14,610 m) maupun yang lebar (27,335 m). Jalan tambang yang lebih sempit dan tikungan dengan radius yang lebih kecil menyebabkan peningkatan resistensi kendaraan sebagai akibatnya, peningkatan konsumsi energi (Meech & Parreira, 2013; Semykina et al., 2022).

Tabel 1. Jalan angkut tambang jalan lurus

No	STA-X (Segmen Jalan)	Lebar Jalan Aktual (m)	AASHTO (m)
1	STA – 1	20,090	
2	STA – 2	16,095	
3	STA – 3	14,610	12,075
4	STA – 4	27,335	
5	STA – 5	25,004	

Pada Tabel 2, tikungan pertama dengan radius aktual 17,33 meter, jauh di bawah standar AASTHO yang sebesar 27,4 meter, truk angkut dipaksa untuk melambat, yang mengakibatkan peningkatan penggunaan bahan bakar saat kendaraan mempercepat kembali setelah melewati tikungan (Choi & Nieto, 2011; Richardson & McIver, 2015).

Selain itu dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4, kemiringan jalan yang bervariasi, dengan beberapa area memiliki kemiringan hingga 9,19%, juga berkontribusi terhadap peningkatan konsumsi bahan bakar, karena kendaraan memerlukan daya lebih besar untuk menanjak pada medan yang curam (Saptarini et al., 2024).

Tabel 2. Jalan angkut tambang pada tikungan

No	Lebar Jalan (m)		Keterangan
	Aktual	AASHTO	
1	17,33		
2	15,30		
3	32,03	27,4	Datar
4	22,41		

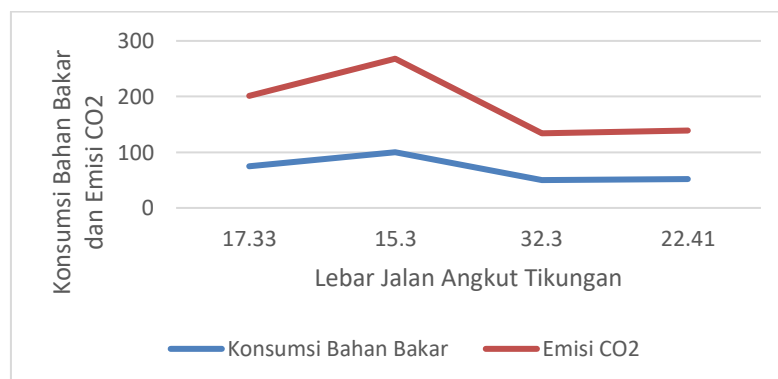
Tabel 3. Kemiringan jalan

Memanjang		Crosslope (%)
Aktual (%)	Standar (%)	
1,90 – 9,19	10 – 15	2 – 4

Tabel 4. Superelevasi pada jalan tambang

No	Jarak Datar (m)	Beda Tinggi (m/m)	Superelevasi Datar (%)	Superelevasi Tikungan (%)	AASHTO max (%)
1	17,33	0,01	0,05	4,485	
2	15,30	0,56	3,65	6,820	4 – 10
3	32,03	0,25	1,16	7,990	
4	22,41	0,01	0,03	5,550	

Analisis ini menyoroti pentingnya kondisi jalan tambang yang optimal untuk menjaga efisiensi bahan bakar, yang pada akhirnya dapat berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂ secara signifikan (Adha, 2023). Temuan ini sejalan dengan literatur yang ada, yang menekankan bahwa faktor-faktor operasional, termasuk medan dan kondisi jalan, memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi energi di sektor transportasi tambang (Bodziony & Patyk, 2024; Hasan & Octariando, 2022). Penelitian ini memperkuat bukti empiris dengan data yang lebih spesifik dan aplikasi di dunia nyata dapat dilihat pada Gambar 1. (Soofastaei et al., 2018) memaparkan hubungan konsumsi bahan bakar dengan *gross vehicle weight (GVW)*.



Gambar 1. Konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ pada tikungan

Pada Gambar 1, jalan tambang dengan geometri tikungan lebar 15,30 m mengkonsumsi bahan bakar sebesar 100 liter/jam dengan emisi CO₂ sebesar 268 Kg CO₂/liter, sedangkan

geometri tikungan lebar 32,03 m mengkonsumsi bahan bakar sebesar 50 liter/jam dengan emisi CO₂ sebesar 134 Kg CO₂/liter.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa kondisi operasional truk angkut di tambang terbuka, khususnya terkait dengan karakteristik jalan dan tikungan, memiliki pengaruh signifikan terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂. Hasil analisis menunjukkan bahwa jalan tambang dengan geometri tikungan yang sempit pada 15,30 m mengkonsumsi lebih banyak bahan bakar dibandingkan dengan geometri tikungan yang lebih lebar pada 32,03 m yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan penggunaan energi. Tikungan yang lebih tajam dan jalan dengan kemiringan tinggi menyebabkan truk angkut harus melakukan akselerasi dan deselerasi lebih sering, yang meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca. Dengan optimasi pada desain jalan tambang, termasuk pelebaran jalan dan perbaikan sudut tikungan, terdapat potensi untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga tingkat yang signifikan. Penelitian ini juga mempertegas pentingnya pengelolaan energi di tambang terbuka, memberikan kontribusi nyata terhadap literatur manajemen energi dan upaya global dalam mengurangi dampak perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- AASTHO, 1993. The American Association of State Highway and Transportation Officials, Manual Rural Highway Desain.
- Adha, H. R. (2023). Analisis Konsumsi Bahan Bakar Alat Angkut Ud Quester Cwe 370 Dalam Kegiatan Pengangkutan Bijih Nikel. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 5(1), 7–20. <https://doi.org/10.36986/impj.v5i1.57>
- Awuah-Offei, K., Osei, B., & Askari-Nasab, H. (2011). *Awuah-Offei K. et al. Modeling Truck-Shovel Energy Efficiency under Uncertainty*.
- Bodziony, P., & Patyk, M. (2024). The Influence of the Mining Operation Environment on the Energy Consumption and Technical Availability of Truck Haulage Operations in Surface Mines. *Energies*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/en17112654>
- Choi, Y., & Nieto, A. (2011). Optimal haulage routing of off-road dump trucks in construction and mining sites using Google Earth and a modified least-cost path algorithm. *Automation in Construction*, 20(7), 982–997. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.03.015>
- Hasan, H., & Octariando, R. (2022). The Effect of Road Grade on Dump Truck Fuel Consumption. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2022-01-5030>
- Kecojevic, V., Komljenovic, D., Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2010). *Haul truck fuel consumption and CO2 emission under various engine load conditions Mining engineering Haul truck fuel consumption and CO 2 emission under various engine load conditions*. www.miningengineeringmagazine.com
- Makarova, I., Mavlyautdinova, G., Mavrin, V., Makarov, D., & Barinov, A. (2022). Improving the Environmental Friendliness of the Mining Complex Through Alternative Fuel for Mine Dump Trucks. *Transportation Research Procedia*, 68, 755–760. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.104>
- Masih-Tehrani, M., Ebrahimi-Nejad, S., & Dahmardeh, M. (2020). Combined fuel consumption and emission optimization model for heavy construction equipment. *Automation in Construction*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103007>

- Meech, J., & Parreira, J. (2013). Predicting wear and temperature of autonomous haulage truck tires. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(PART 1), 142–147. <https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00078>
- Richardson, S., & McIver, J. (2015). Improving Mine Haul Road Roughness to Reduce Haul Truck Fuel Consumption. *SAE Technical Papers*, 2015-March(March). <https://doi.org/10.4271/2015-01-0050>
- Rodvalho, E., Quaglio, O., Felsch Junior, W. S., Pascual, R., de Tomi, G., & Soares Tenório, J. A. (2020). Reducing GHG emissions through efficient tire consumption in open pit mines. *Journal of Cleaner Production*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120185>
- Saptarini, D. L., Hidayatullah, R., Marul, A., & Suprianto, T. (2024). Effect of Transport Road Slope on Fuel Consumption of Coal Mine Transport Truck. *E3S Web of Conferences*, 500. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450003006>
- Semykina, A., Zagorodnii, N., & Novikov, A. (2022). Study of the effectiveness of the organization of the system of maintenance and repair of quarry transport of mining and processing plants. *Transportation Research Procedia*, 63, 983–989. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.097>
- Soofastaei, A., Karimpour, E., Knights, P., & Kizil, M. (2018). Energy-efficient loading and hauling operations. In *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Issue 9783319541983, pp. 121–146). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54199-0_7
- Vera-Burau, A., Álvarez-Ramírez, D., Sanmiquel, L., & Bascompta, M. (2023). A Comparison of the Fuel Consumption and Truck Models in Different Production Scenarios. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/app13095769>
- WALK-AROUND 2. Komatsu HM400-3MO.
- Wang, Q., Zhang, R., Lv, S., & Wang, Y. (2021). Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100977>
- Wincono, R. R., Horman, J. R., Jurusan,), Pertambangan, T., Perminyakan, D., Papua, U., Gunung Salju, J., & Amban, M. (2019). Bakar Dump Truck HINO 500 FG 235 JJ. In *Jurnal Penelitian Tambang* (Vol. 2, Issue 2).