Journal of Science and Engineering

Full Paper

Pengaruh Total *Resistance* Terhadap Produktivitas Dan Speed Unit Alat Angkut Di Pit 4 PT Bara Energi Lestari

Mila Mulidar[1], Yoessi Oktarini[1], Hendra Harisman[1], Moehammad Ediyan Raza Karmel[1], Zati Hulwani[1], Haqul Baramsyah[1], Firman[2]

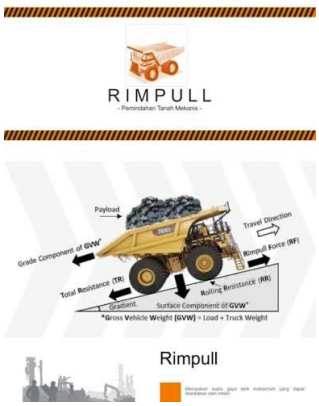
[1]Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

[2]Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Khairun, Ternate, Indonesia

*Corresponding author

milamulidarmhz@gmail.com

Graphical Abstract



Abstrak

PT Bara Energi Lestari merupakan perusahaan tambang batubara di Kabupaten Nagan Raya, Aceh yang menerapkan metode tambang terbuka (open *pit*) dengan target kecepatan alat angkut minimum 20 km/jam dan produktivitas 147 BCM/jam per kilometer. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi geometri jalan angkut berdasarkan Kepmen ESDM Nomor 1827K/30/MEM/2018 serta nilai total *resistance* untuk meningkatkan kecepatan dan produktivitas alat angkut. Metode penelitian menggunakan analisis kuantitatif melalui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan jalan serta simulasi produktivitas dan *cycle time* pada jarak 1 km. Hasil penelitian menunjukkan adanya ketidaksesuaian geometri jalan berupa dua segmen overgrade pada ruas coal getting, 25 segmen lebar jalan yang belum memenuhi standar pada *Overburden* 1, dan lima segmen pada *Overburden* 2. Nilai total *resistance* masing-masing sebesar 3.970,55 lb, 11.400,23 lb, dan 7.662,25 lb. Kecepatan aktual pada ruas coal getting telah memenuhi target (22,46 km/jam), sedangkan *Overburden* 1 (18,96 km/jam) dan *Overburden* 2 (19,96 km/jam) belum memenuhi standar perusahaan. Setelah perbaikan jalan pada *Overburden* 1, kecepatan meningkat menjadi 21,97 km/jam dan produktivitas mencapai 92,87 BCM/jam.

Kata Kunci: Geometri Jalan Angkut, Hambatan Total, Kecepatan Rata-Rata, Produktivitas

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan angkut tambang memiliki peran yang sangat krusial sebagai arteri utama dalam kelancaran operasional penambangan terbuka, khususnya sebagai jalur utama pengangkutan material dari area bukaan (*pit*) menuju lokasi pembuangan (*disposal*) maupun penampungan (*stockpile*) [1]. Oleh karena itu, kondisi fisik dan stabilitas jalur transportasi menjadi faktor penentu utama yang memengaruhi efektivitas kegiatan pemindahan tanah mekanis berskala besar demi menjaga kesinambungan target produksi harian [2]. Untuk mendukung kelancaran operasional sekaligus meminimalkan risiko kecelakaan kerja, perencanaan geometri jalur angkut harus memenuhi standar teknis keselamatan kerja di Indonesia yang telah diatur secara ketat melalui Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 [3]. Selain regulasi nasional tersebut, perencanaan geometrik jalan tambang juga diselaraskan dengan standar internasional yang dikeluarkan oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [4]. Penerapan standar geometri yang tepat terbukti mampu meminimalkan risiko kecelakaan kerja, menekan biaya perawatan suku cadang unit angkut, serta meningkatkan efisiensi waktu edar kendaraan di area penambangan [5].

Sebaliknya, kondisi jalan tambang yang mengalami kerusakan permukaan, bergelombang, atau memiliki geometri tanjakan yang ekstrem dapat menurunkan efisiensi alat angkut secara signifikan [6]. Salah satu faktor

teknis utama yang membatasi performa kecepatan dan kapasitas angkut armada adalah total *resistance* (tahanan total), yang merupakan akumulasi dari *rolling resistance* (tahanan gulir) dan *grade resistance* (tahanan kemiringan) [7]. Nilai total *resistance* yang tinggi menyebabkan unit angkut membutuhkan konsumsi daya mekanis yang jauh lebih besar dari mesin untuk bergerak [8]. Akibatnya, terjadi penurunan kecepatan rata-rata unit, perpanjangan waktu siklus edar (*cycle time*), dan berdampak langsung pada penurunan produktivitas pengangkutan secara keseluruhan [9]. Kerusakan jalan tambang yang tidak segera ditangani juga memicu peningkatan penetrasi ban (*tire penetration*) yang secara linier memperbesar nilai hambatan gulir pada roda kendaraan [10].

PT Bara Energi Lestari (BEL) merupakan perusahaan tambang batubara yang menerapkan metode tambang terbuka (*open pit*) di Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh. Berdasarkan laporan eksplorasi resmi standar JORC, total sumber daya batubara yang dikelola pada konsesi seluas 1.495 hektare ini mencapai sekitar 72 juta metrik ton [11]. Dalam perencanaan operasional penambangan di *Pit* 4, perusahaan telah menetapkan target indikator kinerja utama yang ketat untuk kecepatan minimum alat angkut dan kapasitas produktivitas pemindahan tanah penutup (*overburden*) per kilometer jarak angkut. Penelitian terdahulu di PT Bara Energi Lestari menunjukkan bahwa tingginya kelandaian (*grade*) jalan angkut dan resistensi permukaan tanah berupa *clay* sangat memengaruhi konsumsi bahan bakar dan menurunkan efisiensi waktu edar (*cycle time*) armada [12]. Ketidaksesuaian parameter geometri ini sejalan dengan evaluasi tambang sejenis, di mana lebar jalan lurus maupun tikungan yang berada di bawah standar teknis Kepmen ESDM No. 1827/2018 secara signifikan memangkas kecepatan rata-rata kendaraan.

Beberapa penelitian menunjukkan keterkaitan erat antara kualitas geometri jalan, besaran tahanan gerak, dan pencapaian target produksi tambang [13]. Amalia dan Yulhendra [7] membuktikan bahwa tindakan optimasi geometri jalan serta reduksi total *resistance* di PT Semen Padang berhasil mempercepat waktu siklus angkut sekaligus menaikkan produktivitas alat dari 375,3 ton/jam menjadi 437,88 ton/jam. Penelitian sejenis oleh Silalahi dkk. [8] di PT Kitadin *site* Embalut juga mengonfirmasi bahwa perbaikan parameter *grade resistance* dan kualitas permukaan jalan tambang mampu mendongkrak produktivitas *dumptruck* secara signifikan dari 106,36 BCM/jam menjadi 119,67 BCM/jam. Rekomendasi serupa dari Yadav dkk. [9] menegaskan bahwa pelebaran lajur angkut pada area tikungan tajam sangat krusial untuk mencegah penurunan kecepatan unit angkut secara drastis saat berpapasan.

Perbedaan mendasar antara penelitian ini dengan studi-studi terdahulu terletak pada penerapan pendekatan empiris berbasis data riil lapangan yang membandingkan kondisi performa unit secara presisi pada fase sebelum dan sesudah perbaikan jalan secara aktual. Pengukuran parameter daya dukung dasar jalur tambang dilakukan melalui kuantifikasi nilai kedalaman jejak ban (*tire penetration*) secara manual pada setiap segmen jalan untuk menghasilkan perhitungan *rolling resistance* yang akurat sesuai kondisi nyata di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi parameter geometri jalan angkut di *Pit* 4 PT Bara Energi Lestari, mereduksi dampak negatif total *resistance*, serta merumuskan strategi teknik guna memastikan ketercapaian target produktivitas operasional yang ditetapkan oleh perusahaan.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara empiris di wilayah operasional *Pit* 4 PT Bara Energi Lestari, yang secara administratif mencakup area konsesi Desa Krueng Mangkom, Alue Buloh, Paya Udeung, dan Seumambek, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh. Kondisi tatanan geologi regional pada lokasi penyelidikan merupakan bagian dari Formasi Tutut pembawa sisipan batubara yang berumur pliopleitosen. Aksesibilitas menuju lokasi penelitian dari pusat Kota Banda Aceh menuju Kota Meulaboh membutuhkan waktu tempuh sekitar 4–5 jam menggunakan kendaraan bermotor jalur darat. Perjalanan dilanjutkan dari pusat Kota Meulaboh menuju ke area *turning* PT Mifa Bersaudara di Kecamatan Peunaga dengan waktu tempuh ±20 menit. Jalur pencapaian terakhir dari area *turning* tersebut menuju ke *Pit* 4 PT Bara Energi Lestari memiliki jarak tempuh ±24 km yang diakses menggunakan fasilitas bus khusus operasional karyawan perusahaan.

Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu 2 bulan mulai dari awal bulan Mei hingga akhir bulan Juni Tahun 2025 di PT Bara Energi Lestari. Komponen data primer penunjang aspek kuantitatif dalam penelitian ini meliputi: (1) *tracking* koordinat batas segmen jalan angkut, (2) pencatatan waktu edar (*cycle time*) unit alat angkut, dan (3) pengukuran kedalaman jejak roda (*tire penetration*) pada permukaan base jalan. Data sekunder yang dikumpulkan mencakup: (1) spesifikasi mekanis alat gali muat dan alat angkut, (2) peta situasi kontur *Pit* 4 PT Bara Energi Lestari, (3) foto udara ortofoto tangkapan *drone* wilayah operasional, (4) tingkat efisiensi kerja aktual alat angkut periode Mei–Juni, dan (5) target rencana produktivitas *overburden* harian.

Instrumen peralatan fisik yang digunakan terdiri atas: (1) perangkat *Real-Time Kinematic* (RTK) GPS untuk melakukan *tracking* koordinat guna pemetaan geometri akurat, (2) alat *stopwatch* digital untuk menghitung

distribusi waktu siklus mekanis secara presisi, (3) perangkat laptop sebagai media komputasi data *input*, (4) alat tulis lapangan untuk mencatat pencatatan parameter operasional, (5) kelengkapan Alat Pelindung Diri (APD) standar K3 pertambangan, dan (6) kamera *handphone* sebagai media dokumentasi teknis kegiatan.

Seluruh data *tracking* koordinat horizontal dan vertikal hasil pengukuran RTK GPS diolah menggunakan bantuan perangkat lunak sistem informasi geografis QGIS. Lintasan pengangkutan dibagi secara sistematis menjadi beberapa segmen dengan panjang interval ±50 meter per segmen. Dimensi lebar riil jalan angkut diukur menggunakan fasilitas fitur *tools measure line* pada lembar kerja digital. Persentase kemiringan jalan (*grade*) pada setiap segmen tanjakan dihitung secara matematis menggunakan perbandingan beda tinggi vertikal (Δh) dan jarak datar horizontal (Δh)melalui formulasi [13]:

$$Grade\ (\%) = \frac{\Delta h}{\Delta x} x\ 100\% \quad (1)$$

Evaluasi ambang batas kelayakan geometri jalan angkut mengacu pada regulasi nasional Keputusan Menteri ESDM No. 1827K/30/MEM/2018 [3]. Untuk jalur lurus dua arah, standar lebar minimum mengadopsi ketetapan rule of thumb internasional AASHTO dengan mengalikan 3,5 kali lebar kendaraan angkut terbesar [4]:

$$Lmin = n\ x\ Wt + (n+1)x\left(\frac{1}{2}xWt\right) \quad (2)$$

Berdasarkan spesifikasi *dump truck* Iveco Trakker (lebar 2,55 m), batas aman lajur lurus adalah 8,93 m, sedangkan untuk armada besar OHT Caterpillar 773E (lebar 5,076 m) memerlukan batas lebar jalan lurus minimal 17,766 m dan area belokan minimal 19,129 m. Analisis gaya sentrifugal pada belokan tajam serta kestabilan manuver dievaluasi menggunakan parameter superelevasi (e) dan radius tikungan (R) melalui rasio kesetimbangan gesekan melintang [14]:

$$e + f = \frac{V^2}{127xR} \quad (3)$$

Besaran nilai tahanan gulir (*Rolling resistance* atau RR) dikuantifikasi secara empiris berdasarkan nilai kedalaman pengetesan penumpukan roda atau *tire penetration* (TP) dalam satuan sentimeter menggunakan formula standar mekanis [13]:

$$CRR = 2\% + (0{,}6\% xTP) \quad (4)$$

$$RR = CRR\ x\ Berat\ Kendaraan\ Beroda\ (ton) \quad (5)$$

Tahanan kemiringan (*Grade resistance* atau GR) diperoleh dari persentase kemiringan lintasan dikalikan dengan bobot kotor kendaraan (*Gross Vehicle Weight* atau GVW) menggunakan faktor konversi ekuivalen [14]:

$$GR = \frac{20lb}{ton} x\ grade\ (\%) \quad (6)$$

Tahanan gerak total (Total *Resistance* atau TR) dihitung dari penjumlahan nilai tahanan gulir dan tahanan kemiringan [7]:

$$TR = RR + GR \quad (7)$$

Besaran *rimpull* yang dibutuhkan untuk menggerakkan unit dievaluasi menggunakan perkalian TR (lb/ton) terhadap total berat kendaraan [15]. Perkiraan batas kecepatan kendaraan dikorelasikan secara grafis menggunakan kurva kemampuan tarik mekanis mesin (*tractive effort / rimpull curve*) yang disesuaikan berdasarkan lembar spesifikasi masing-masing pabrikan.

Kapasitas kemampuan produktivitas operasional dari kombinasi alat muat dan alat angkut dikalkulasikan menggunakan pendekatan matematis [16]:

$$Q = \frac{60}{Ct} x\ n\ x\ Kb\ x\ Ek\ x\ SF\ x\ BFF \quad (8)$$

Di mana Q melambangkan tingkat produktivitas (BCM/jam), Ct melambangkan waktu edar total kendaraan (menit), n melambangkan jumlah siklus pengisian mangkuk, Kb melambangkan volume kapasitas teoritis *bucket* (m^3), Ek melambangkan persentase efisiensi kerja nyata (%),SF melambangkan *swell factor* material, dan BFF melambangkan indeks *bucket fill factor* [17]. Untuk menyelaraskan dengan kebijakan target rencana perusahaan yang berbasis jarak acuan standar 1 kilometer, dilakukan tahapan simulasi konversi travel waktu

menggunakan variabel kecepatan rata-rata aktual hasil *monitoring* sebagai dasar utama penyusunan variabel *cycle time* simulasi [18].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Evaluasi Geometri Jalan Angkut

Hasil evaluasi terhadap parameter geometri jalur logistik penambangan pada tiga ruas utama di Pit 4 PT BEL menunjukkan variasi pemenuhan standar teknis keselamatan kerja. Berdasarkan data rekapitulasi, ruas *Coal Getting* (CG) mengindikasikan adanya deviasi pada parameter kelandaian jalan (grade) yang melampaui batas rencana perusahaan, sementara ruas *Overburden* 1 (OB1) dan *Overburden* 2 (OB2) memiliki kendala kritis pada penyempitan dimensi lebar jalan yang tidak memenuhi standar minimum. Data komparatif dimensi geometri dan visualisasi parameter aktual untuk masing-masing jalur angkut disajikan secara rinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Evaluasi Geometri Jalan Angkut *Pit* 4 PT BEL

Parameter	Satuan	CG	OB1	OB2
Jarak Angkut	Km	1,3	2,2	1,5
Jumlah segmen terukur	Segmen	26	25	16
Grade maks. aktual	%	9,74 (2 segmen >8%)	5,38 (ideal)	2,31 (ideal)
Lebar std. minimum	M	8,93	17,77	17,77
Segmen lebar tidak standar	Segmen	0	25	5
Alat angkut	-	DT Iveco Trakker 440	OHT CAT 773E	OHT CAT 773E

Ruas jalan *coal getting* memiliki kondisi geometri terbaik diantara ketiga ruas jalan lainnya. Dua segmen *overgrade* (9,43% dan 9,74%) pada segmen 24 dan 25 masih dalam batas toleransi operasional dan tidak berdampak signifikan terhadap kecepatan alat angkut secara keseluruhan, akan tetapi tetap memerlukan perbaikan. Seluruh segmen jalan pada ruas jalan *overburden* 1 memiliki lebar aktual berkisar antara 11,38 – 17,16 m, dibawah batas minimum 17,766 m dimana kondisi tersebut secara langsung membatasi *manuver* alat OHT berukuran besar. Ruas jalan *overburden* 2 memiliki 5 segmen jalan dengan lebar yang tidak standar yaitu pada segmen 9 – 12 dan segmen 8 (tikungan).

3.2. Nilai Total *Resistance*

Total *resistance* tiap ruas jalan angkut diperoleh dari penjumlahan *rolling resistance* berdasarkan penetrasi ban dan *grade resistance* berdasarkan kemiringan segmen. Tabel 2 merangkum nilai total *resistance* rata-rata pada kondisi bermuatan. Nilai total *resistance* kondisi bermuatan dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Nilai Total *Resistance* Rata-Rata Bermuatan (*Rimpull Equivalent*)

Jalan	RR (lb)	GR (lb)	TR (lb)	Kategori Jalan
CG	2.018	1.952	3.970	Kokok & Terawat
OB 1 (sebelum perbaikan)	6.250	5.149	11.400	Tanah Lunak atau Berlubang
OB 1 (Setelah Perbaikan)	4.441	5.150	9.591	Tanah dengan Perawatan
OB 2	6.753	908	7.662	Bervariasi (2 Segmen Lunak)

Perbedaan nilai total *resistance* antar ruas sangat signifikan. Ruas *coal getting* memiliki nilai TR paling rendah karena permukaan jalannya terdiri dari campuran sirtu dan *clay* (10:1,5), menghasilkan kepadatan tinggi dan penetrasi ban kecil (rata-rata 0,68 cm). Sebaliknya, ruas *overburden* 1 memiliki TR tertinggi karena dua segmen awal (segmen 1 dan 4) mengalami penetrasi ban sangat dalam (9,33 cm dan 10 cm), mengindikasikan permukaan jalan yang lunak dan tidak terkonsolidasi dengan baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa material jalan *overburden* yang hanya berupa *clay* tanpa pengerasan sirtu berkontribusi besar terhadap tingginya total *resistance*.

3.3. Pengaruh Total *Resistance* terhadap Kecepatan dan Produktivitas

Total *resistance* (TR) merupakan gabungan dari *rolling resistance* dan *grade resistance* yang harus diatasi oleh alat angkut selama proses pengangkutan material. Semakin besar nilai total *resistance*, semakin besar pula kebutuhan *rimpull* yang diperlukan untuk menggerakkan alat angkut. Kondisi tersebut menyebabkan kecepatan aktual kendaraan menurun sehingga berdampak pada peningkatan *cycle time* dan penurunan produktivitas.

Berdasarkan hasil penelitian, ruas jalan *coal getting* memiliki nilai total *resistance* terendah yaitu 3.970,55 lb dengan kecepatan aktual sebesar 22,46 km/jam. Nilai tersebut telah memenuhi target perusahaan sebesar ≥20 km/jam. Sebaliknya, pada ruas *overburden* 1 diperoleh nilai total *resistance* tertinggi yaitu 11.400,23 lb dengan kecepatan aktual hanya 18,96 km/jam, sehingga belum memenuhi target perusahaan. Sementara itu, ruas *overburden* 2 memiliki total *resistance* sebesar 7.662,25 lb dengan kecepatan aktual 19,96 km/jam, yang juga masih berada di bawah target perusahaan. Hubungan total *resistance* dan kecepatan aktual dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hubungan Total *Resistance* dan Kecepatan Aktual

Jalan	TR (lb)	Kecepatan Aktual (km/jam)
CG	3.970,55	22,46
OB 1	11.400,23	18.96
OB 2	7.662,25	19,96
Target		≥20

Tabel 3 menunjukkan adanya kecenderungan hubungan berbanding terbalik antara total *resistance* dan kecepatan alat angkut. Pada kondisi total *resistance* yang rendah (3.970,55 lb), alat angkut mampu mencapai kecepatan 22,46 km/jam. Sebaliknya, peningkatan total *resistance* hingga 11.400,23 lb menyebabkan penurunan kecepatan menjadi 18,96 km/jam. Hal ini terjadi karena sebagian besar daya mesin digunakan untuk mengatasi hambatan gerak kendaraan.

Penurunan kecepatan akibat tingginya total *resistance* juga berdampak langsung terhadap produktivitas alat angkut. Kecepatan yang lebih rendah menyebabkan waktu tempuh bertambah sehingga *cycle time* meningkat dan jumlah siklus pengangkutan per jam menjadi lebih sedikit. Akibatnya, produktivitas alat angkut mengalami penurunan. Hubungan total *resistance* dan produktivitas dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hubungan Total *Resistance* dan Produktivitas

Jalan	TR (lb)	Produktivitas (BCM/jam)
OB 1	11.400,23	90,89
OB 2	7.662,25	108,74
Target		147

Berdasarkan Tabel 4, ruas *overburden* 1 yang memiliki total *resistance* tertinggi menghasilkan produktivitas terendah yaitu 90,89 BCM/jam. Sementara itu, pada ruas *overburden* 2 dengan total *resistance* yang lebih rendah sebesar 7.662,25 lb, produktivitas meningkat menjadi 108,74 BCM/jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penurunan total *resistance* berkontribusi terhadap peningkatan kecepatan dan produktivitas alat angkut.

Untuk meningkatkan performa jalan angkut, dilakukan simulasi perbaikan geometri jalan dan pengurangan *rolling resistance*. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan kecepatan pada ruas *overburden* 1 dari 18,96 km/jam menjadi 21,97 km/jam, disertai peningkatan produktivitas dari 90,89 BCM/jam menjadi 92,87 BCM/jam. Pada ruas *overburden* 2, simulasi menghasilkan produktivitas sebesar 151,53 BCM/jam, yang telah melampaui target perusahaan sebesar 147 BCM/jam. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengurangan hambatan jalan melalui perbaikan geometri dan kondisi permukaan jalan merupakan upaya yang efektif untuk meningkatkan kinerja alat angkut. Perbandingan nilai kecepatan dan produktivitas alat angkut dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Komparasi Nilai Kecepatan dan Produktivitas Alat Angkut

Jalan	Kecepatan (km/jam)	Produktivitas (BCM/jam)
OB 1 (Sebelum Perbaikan)	18,96	90,89
OB 1 (Setelah Perbaikan)	21,97	92,87

Jalan	Kecepatan (km/jam)	Produktivitas (BCM/jam)
OB 2 (Sebelum Perbaikan)	19,96	108,74
OB 2 (Simulasi Perbaikan)	>20	151,53
Target	≥20	147

3.4. Simulasi Optimasi Ruas *Overburden 2*

Pada *overburden* 2, perbaikan aktual tidak dilakukan selama periode penelitian. Namun, nilai TR yang relatif lebih rendah (7.662,25 lb) dibandingkan *overburden* 1 sebelum perbaikan disebabkan oleh *grade resistance* yang kecil (rata-rata kemiringan hanya 0,03–2,31%), bukan karena kondisi permukaan jalan yang baik. Segmen 15 dan 16 terbukti bermasalah dengan penetrasi ban ekstrem (12,66 cm dan 10 cm), menghasilkan RR masing-masing 192 lb/ton dan 160 lb/ton—masuk kategori permukaan lumpur atau berlubang (Projosumarto, 1995).

Simulasi perbaikan *rolling resistance* pada seluruh segmen (terutama segmen 14, 15, 16) menunjukkan potensi besar peningkatan performa. Dengan asumsi penetrasi ban diturunkan ke level standar jalan berperawatan baik, *cycle time* dapat diperpendek menjadi 8,25 menit untuk jarak 1,5 km (atau 6,63 menit untuk 1 km). Produktivitas simulasi mencapai 121,78 BCM/jam (jarak 1,5 km) dan 151,53 BCM/jam setelah dikonversi ke jarak 1 km—melampaui target perusahaan 147 BCM/jam. Ini membuktikan bahwa kendala utama produktivitas *overburden* 2 adalah kondisi permukaan jalan pada segmen akhir, bukan kapasitas alat ataupun kemiringan jalan.

4. KESIMPULAN

Total *resistance* (TR) terbukti berpengaruh signifikan terhadap performa alat angkut, di mana perbaikan geometri dan material permukaan jalan (dari *clay* menjadi sirtu) mampu memangkas *cycle time* serta meningkatkan kecepatan dan produktivitas alat secara signifikan. Optimasi *rolling resistance* pada area *overburden* bahkan berhasil melampaui target produktivitas yang ditetapkan perusahaan. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi perbaikan perkerasan material, koreksi lebar jalan sesuai standar Kepmen ESDM No. 1827K/30/MEM/2018, dan pemeliharaan berkala sangat efektif untuk mencegah deformasi jalan angkut. Prospek penerapan metode ini dapat menjadi acuan standar bagi industri pertambangan dalam mengoptimalkan efisiensi jalur logistik alat angkut material.

Untuk pengembangan penelitian ke depan, disarankan untuk menganalisis korelasi total *resistance* terhadap konsumsi bahan bakar, biaya operasional, serta pengaruh parameter *Unsurfaced Road Condition Index* (URCI) dan faktor kemampuan operator alat angkut. Secara praktis, perusahaan direkomendasikan untuk melapisi jalan angkut dengan material FABA *(Fly Ash Bottom Ash*) atau sirtu guna meminimalkan hambatan roda demi menjaga stabilitas produktivitas jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Bara Energi Lestari (PT BEL), Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh, atas dukungan data penelitian serta kesempatan yang diberikan untuk melaksanakan penelitian di lingkungan perusahaan. Dukungan tersebut sangat berarti dalam menunjang kelancaran proses penelitian hingga penyusunan artikel ilmiah ini.

REFERENCES

[1] R. Thompson and A. Visser, "Selection and Maintenance Guidelines for Opencast Mine Haul Road Wearing Courses," Int. J. Mining, Reclamation and Environment, vol. 18, no. 2, pp. 113–132, 2004.
[2] A. Soofastaei and M. Fouladgar, "Advanced Fleet Analytics and Fuel Efficiency Modeling in Open-Pit Hauling Operations," J. Mining Sci., vol. 58, no. 4, pp. 602–614, 2022.
[3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik, Jakarta, 2018.
[4] AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7th ed. Washington, D.C., USA: AASHTO, 2018.
[5] J. Baek and Y. Choi, "A New Method for Haul Road Design in Open-pit Mines to Support Efficient Truck Haulage Operations," Appl. Sci., vol. 7, no. 7, p. 747, 2017.
[6] H. S. B. Diko, A. Triantoro, and N. A. Kristanto, "Evaluasi Geometri Jalan Angkut Batubara Berdasarkan Alat Angkut Terbesar Mekanis di Area Pertambangan," J. Teknol. Pertambangan, vol. 9, no. 1, pp. 25–34, 2023.
[7] S. Amalia and D. Yulhendra, "Kajian Pengaruh Total Resistance Terhadap Produktivitas Pengangkutan Batu Kapur Di Front C PT. Semen Padang," Bina Tambang, vol. 5, no. 3, pp. 7–17, 2020.

[8] D. Silalahi, A. Triantoro, and R. N. Hakim, "Analisis Pengaruh Total Resistance terhadap Kecepatan Alat Angkut Dump truck Hd 785 Dalam Kegiatan Pengangkutan Overburden," Geosapta, vol. 5, no. 1, pp. 1–4, 2019.

[9] P. K. Yadav, R. B. Singh, R. Kumar, R. K. Singh, and M. Ali, "Design of Surface Mine Haul Road," Int. J. Sci. Technol. Eng., vol. 3, no. 5, pp. 228–233, 2016.

[10] P. J. Etwiory and B. Triyanto, "Evaluation Of Mine Haul Roads Geometry And Drainage Design At Pt. Sumber Anugerah Buana, Sorong Regency, West Papua Province: Evaluasi Geometri Jalan Angkut Tambang Dan Rancangan Drainase Pada Pt. Sumber Anugerah Buana Kabupaten Sorong Provinsi Papua Barat," INTAN Jurnal Penelitian Tambang, vol. 1, no. 1, pp. 53–58, 2022.

[11] PT Bara Energi Lestari, "Profil Perusahaan",belcoal.co.id. [Online]. Available: https://belcoal.co.id/about/profile. [Accessed: Oct. 9, 2026].

[12] D. F. Akbar, R. Aryanto, and M. K. Herdyanti, "Analisis Pengaruh Grade Jalan Pada Proses Pengangkutan 2Overburden Terhadap Fuel Consumption Alat Angkut Dumptruck di PT.Bara Energi Lestari, Nagan Raya, Aceh Barat," Jurnal GEOSAPTA, vol. 8, no. 2, pp. 117–125, Jul. 2022, doi: 10.20527/jg.v8i2.13369.

[13] G. R. S. Maior, R. L. Peroni, and J. L. V. Mariz, "Assessing the impact of road geometry and rolling resistance on transportation costs and productivity in an iron ore mine in Brazil," REM - International Engineering Journal, vol. 78, no. 3, pp. 321–335, 2025.

[14] T. Riyanto, A. Triantoro, Riswan, and Y. D. Olla, "Evaluasi Jalan Tambang Berdasarkan Geometri Dan Daya Dukung Pada Lapisan Tanah Dasar Pit Tutupan Area Highwall," Jurnal Himasapta, vol. 1, no. 2, pp. 50–56, 2016.

[15] L. M. G. Santos, R. C. Silva, and R. Thompson, "Assessing the Impact of Road Geometry and Rolling resistance on Transportation Costs and Productivity in an Open-Pit Mine," Remed: Mining J., vol. 78, no. 3, pp. 321–335, 2025.

[16] H. M. Simatupang, Franto, and Mardiah, "Evaluation of Haul Road Geometry for Overburden Stripping and Transport from Mining Front to Disposal at PT Muara Alam Sejahtera, South Sumatra," JSE Journal of Science and Engineering, vol. 5, no. 1, pp. 7–17, 2026.

[17] Y. T. Prasetyo, M. Paradise, and F. Mukarrom, "Productivity Assessment of Digging and Loading Equipment (Cat 330D2L) and Hauling Equipment (Fuso 220PS) in Coal Mining," Indonesian J. Earth Sci., vol. 4, no. 2, pp. 1–10, 2024.

[18] S. Hadi and Kartini, "Pengamatan pola muat terhadap produktivitas alat gali muat pada pengupasan lapisan tanah penutup," Jurnal Poros Teknik, vol. 12, no. 2, pp. 91–98, 2020.