

Optimasi Kebutuhan Alat Berat Pada Pekerjaan Galian Proyek Jalan Tol Menggunakan Model Simulasi EZStrobe untuk Biaya dan Emisi Karbon

F.W. Saputro¹, T.N. Handayani^{1*}, A. Aminullah¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: tantri.n.h@ugm.ac.id

INTISARI

Infrastruktur jalan tol berperan penting dalam meningkatkan efisiensi mobilisasi manusia dan barang. Pembangunan infrastruktur ini harus mempertimbangkan aspek biaya dan dampak lingkungan. Dalam upaya tersebut, alat berat menjadi komponen yang sangat penting. Sehingga, penggunaan alat berat perlu dioptimalkan karena berpengaruh pada produktivitas, biaya, dan emisi karbon. Penelitian ini mengembangkan pendekatan pemodelan simulasi untuk mengoptimasi penggunaan alat berat dalam pekerjaan galian. Model berbasis EZStrobe digunakan untuk menganalisis hubungan produktivitas dengan biaya dan emisi karbon dengan pendekatan simulasi kejadian diskrit. Simulasi dilakukan berdasarkan data siklus kerja alat berat dan diverifikasi dengan membandingkan hasil simulasi EZStrobe dengan analisis manual. Hasil verifikasi menunjukkan nilai *error* mencapai titik stabil dan validasi model dengan persentase *error* sebesar 3.98%. Model ini berhasil mengidentifikasi konfigurasi alat berat yang memberikan keseimbangan optimal antara indeks produktivitas-biaya sebesar 64.00 dan produktivitas-emisi sebesar 250.63. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan simulasi EZStrobe efektif digunakan dalam perencanaan dan pengambilan keputusan pada proyek konstruksi yang berkelanjutan.

Kata kunci: optimasi, EZStrobe, produktivitas, biaya, emisi

1 PENDAHULUAN

Pembangunan jalan tol merupakan proyek strategis yang bertujuan untuk meningkatkan konektivitas antarwilayah, mendukung aktivitas ekonomi, serta mempercepat mobilitas barang dan manusia (Ahmad, 2022). Namun, pelaksanaannya sering menghadapi tantangan, seperti keragaman kondisi lahan, keterbatasan waktu, serta kebutuhan sumber daya, termasuk alat berat, yang tidak hanya mempengaruhi efisiensi proyek tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon akibat penggunaan alat berat. Dalam konteks tersebut, optimasi penggunaan dan jumlah alat berat menjadi langkah penting dalam mengelola biaya serta mengurangi emisi karbon untuk mendukung pembangunan berkelanjutan (Andani dkk., 2019).

Optimasi pada awalnya dilakukan secara manual menggunakan model matematis deterministik. Pendekatan ini memanfaatkan persamaan model matematis sederhana untuk mengevaluasi fungsi tujuan dan kendala. Namun, pendekatan manual ini memiliki keterbatasan, terutama dalam menangani sistem yang kompleks dengan ketidakpastian tinggi variabel yang sulit diprediksi, seperti sulitnya memperhitungkan variabel acak. Untuk mengatasi hal tersebut, optimasi berbasis simulasi dikembangkan, memungkinkan integrasi algoritma optimasi dengan simulasi untuk mengevaluasi sistem secara iteratif dan lebih realistis (Jian & Henderson, 2015).

Perkembangan lebih lanjut dalam penelitian simulasi optimasi mengarah pada penggunaan *Discrete Event Simulation* (DES). DES adalah teknik simulasi yang memodelkan sistem melalui perubahan status berbasis kejadian diskrit pada waktu tertentu (Amaran dkk., 2016). Teknik ini digunakan diberbagai bidang, termasuk transportasi material dengan mengevaluasi metrik kinerja seperti waktu tunggu rata-rata dan *throughput* sistem (Shankar, 1991).

Dalam bidang konstruksi, DES telah menunjukkan kemajuan signifikan. Teknik ini membantu mengoptimalkan produksi di bangunan manufaktur dan meningkatkan efisiensi logistik pada operasi *earthwork*, seperti pengisian tanah dan transportasi material (Alsakka dkk., 2020; Zankoul dkk., 2015). Selain itu, DES juga digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan pekerjaan *earthwork* dengan mengintegrasikan data emisi karbon dan konsumsi bahan bakar alat berat secara *real-time* (Hong & Lü, 2022).

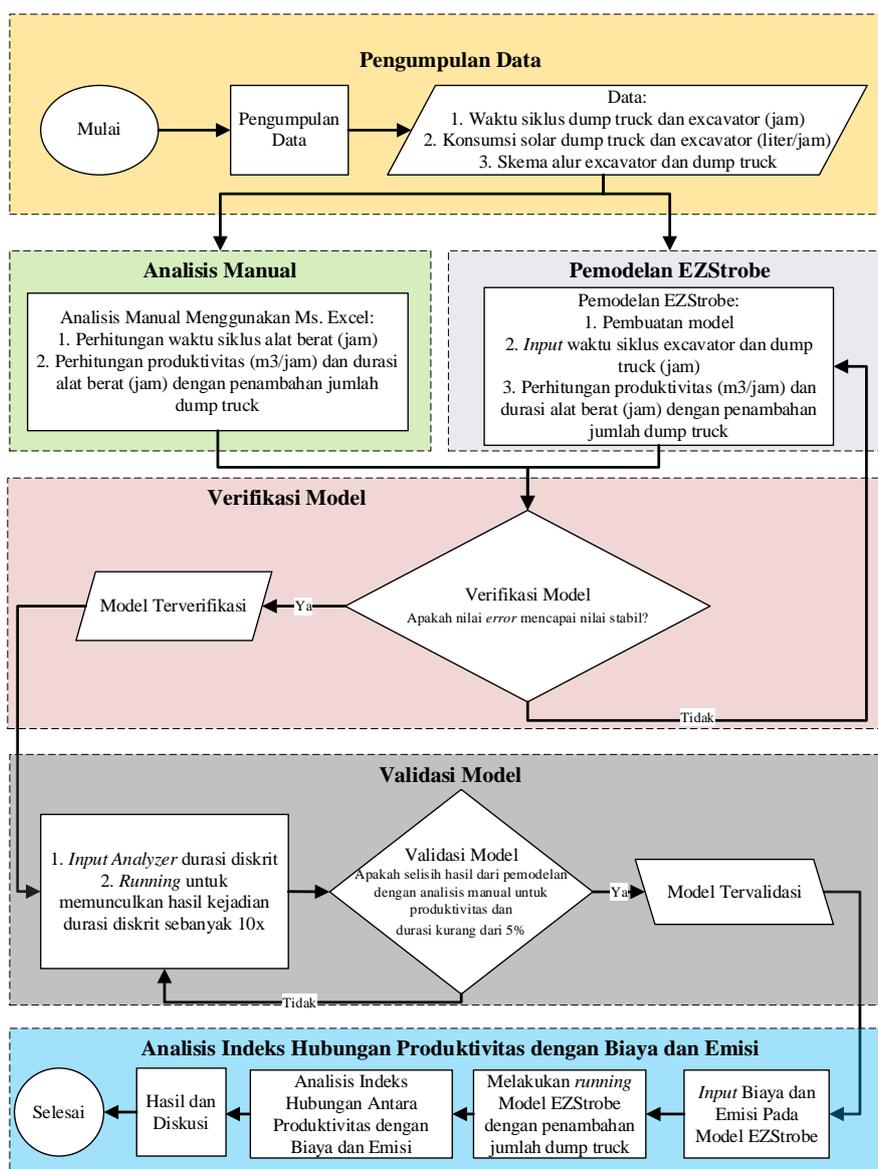
Keefektifan DES dalam meningkatkan efisiensi pekerjaan telah dibuktikan dalam berbagai studi kasus. Sebagai contoh, Indrawan dkk. (2024) menemukan bahwa model simulasi DES memiliki tingkat kesalahan hanya 4.74%,

sehingga dapat diandalkan untuk merepresentasikan kondisi lapangan sekaligus mendukung upaya keberlanjutan, seperti pengurangan emisi karbon pada proyek konstruksi. Muthaher dkk. (2021), dalam studi pada Proyek Underpass Kaliurang di Yogyakarta, menunjukkan bahwa simulasi DES menghasilkan konfigurasi optimal berupa empat excavator besar dan 90 truk kecil. Konfigurasi ini memiliki indeks produktivitas-biaya sebesar 18.22, jauh lebih baik dibandingkan konfigurasi awal yang hanya mencapai indeks 5.3.

Namun, kedua penelitian tersebut memiliki keterbatasan dalam menganalisis hubungan indeks produktivitas dengan emisi karbon. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kebutuhan alat berat dump truck dalam proses pengangkutan material galian, sekaligus menganalisis hubungan produktivitas, biaya, dan emisi karbon. Penelitian ini menggunakan model simulasi berbasis EZStrobe yang terintegrasi dengan Microsoft Visio dan mengadopsi pendekatan simulasi kejadian diskrit.

2 METODE PENELITIAN

Metode penelitian tercantum pada Gambar 1 dalam bentuk diagram alir berikut ini:

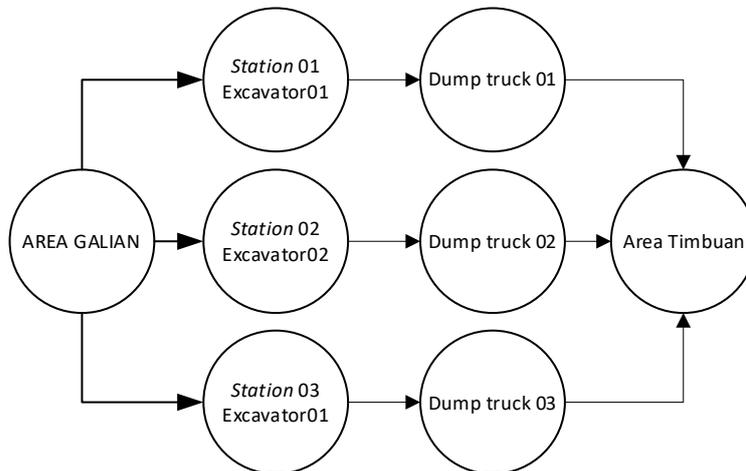


Gambar 1. Diagram penelitian.

2.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini berdasarkan proyek konstruksi yang melibatkan aktivitas galian dan pemindahan tanah menggunakan alat berat. Area galian dan timbunan dihubungkan melalui jalur operasional dengan

estimasi jarak tempuh ± 600 meter. Jalur ini berupa akses internal proyek yang telah diratakan dan cukup lebar untuk dilalui oleh dump truck dan alat berat lainnya secara dua arah. Data yang dikumpulkan mencakup waktu kedatangan dan keberangkatan dump truck serta waktu siklus kerja excavator. Seluruh waktu dicatat dalam satuan detik dan kemudian dikonversi ke dalam jam untuk keperluan analisis produktivitas. Lokasi galian dalam simulasi dibagi menjadi 3 *station* masing-masing menggambarkan kombinasi tipikal antara jumlah unit dump truck dan excavator yang digunakan. Jumlah siklus yang dianalisis terdiri dari >300 siklus dump truck dan >700 siklus excavator. Skema alur alat berat ini berdasarkan pada skenario umum yang mempresentasikan praktik konstruksi di lapangan. Skema ini terlampir pada Gambar 2 berikut ini:



Gambar 2. Skema alur transportasi material.

2.2 Analisis Manual

Dump truck menjadi faktor pengendali dalam menentukan nilai produksi pekerjaan galian, Pada Tabel 1 berikut ini merupakan rumus perhitungan analisis manual: (Indrawan dkk., 2024; Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM & Energi -Sub Bidang Ketenagalistrikan, 2018; Muthaher dkk., 2021; Peurifoy dkk., 2024) :

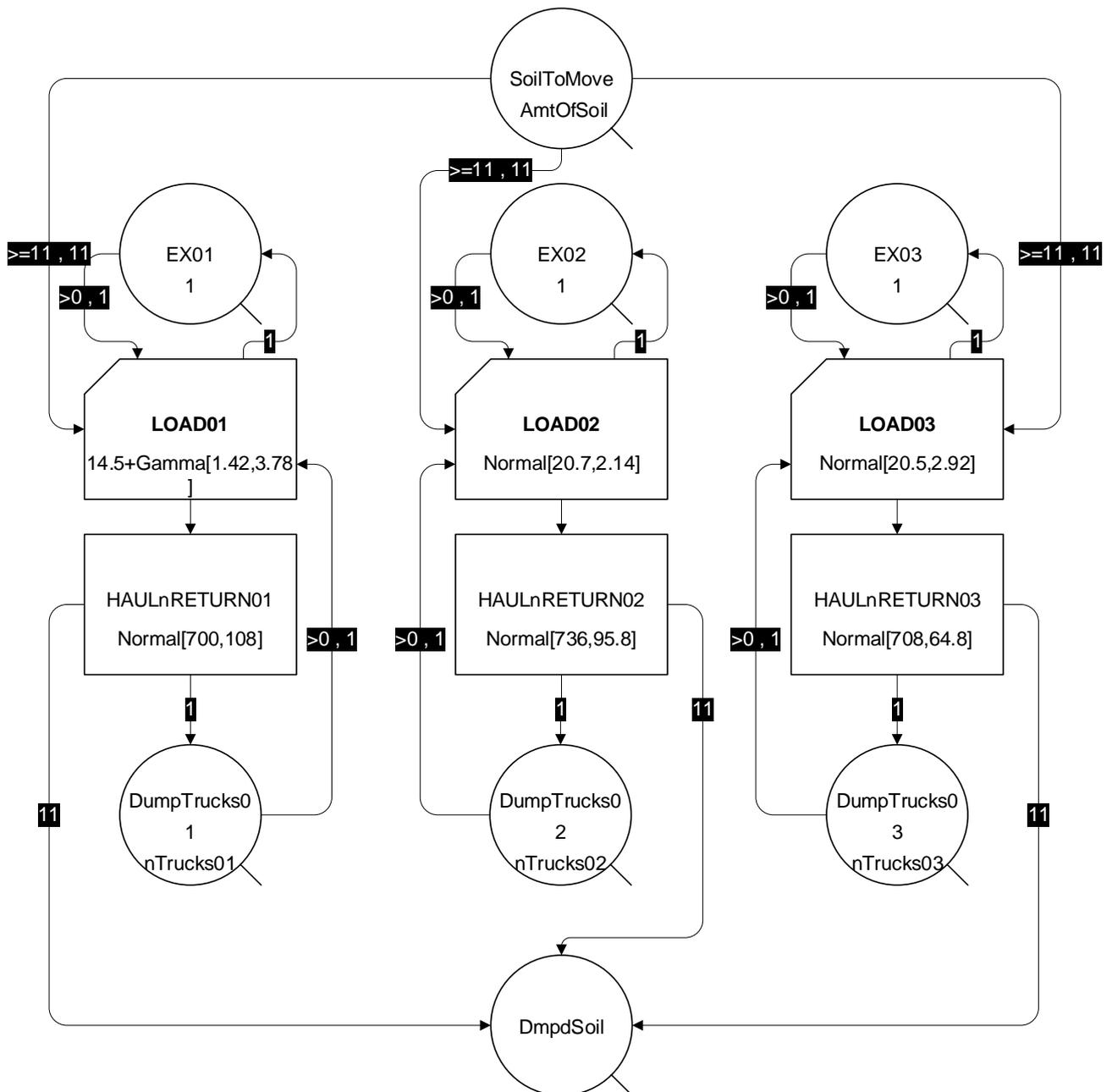
Tabel 1. Rumus manual.

No		Rumus	Keterangan
1	P	$= \frac{Q \times n \times 60}{t \times fk}$	Produktivitas
2	P	$= \frac{Q \times 60}{t \times fk}$	Produktivitas <i>balance number of truck</i>
3	D	$= \frac{V}{P}$	Durasi
4	K	$= E + J$	Biaya sewa
5	Emisi karbon (kg/tahun)	$= \text{Konsumsi Energi (Tj/tahun)} + \text{FaktorEmisi karbon (kg/Tj)}$	Emisi karbon

P merupakan produktivitas (m^3/jam), Q adalah kapasitas dump truck (m^3), n adalah jumlah dump truck (unit), t adalah waktu siklus truk (jam), dan fk merupakan faktor koreksi dari kondisi tanah lepas menjadi tanah asli. Perhitungan durasi (D) pemindahan tanah bergantung pada volume (V) tanah yang akan dipindahkan. Sementara itu, K merepresentasikan biaya sewa alat berat (Rp/jam), E adalah total biaya pasti (Rp/jam), dan J merupakan total biaya operasional (Rp/jam). Selain itu, T_j adalah singkatan dari terajoule, yaitu satuan energi yang setara dengan 1 triliun joule (10^{12} joule).

2.3 Pemodelan EZStrobe

Model EZStrobe dapat disusun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Model ini menggambarkan proses secara lebih rinci sesuai dengan alur kerja.

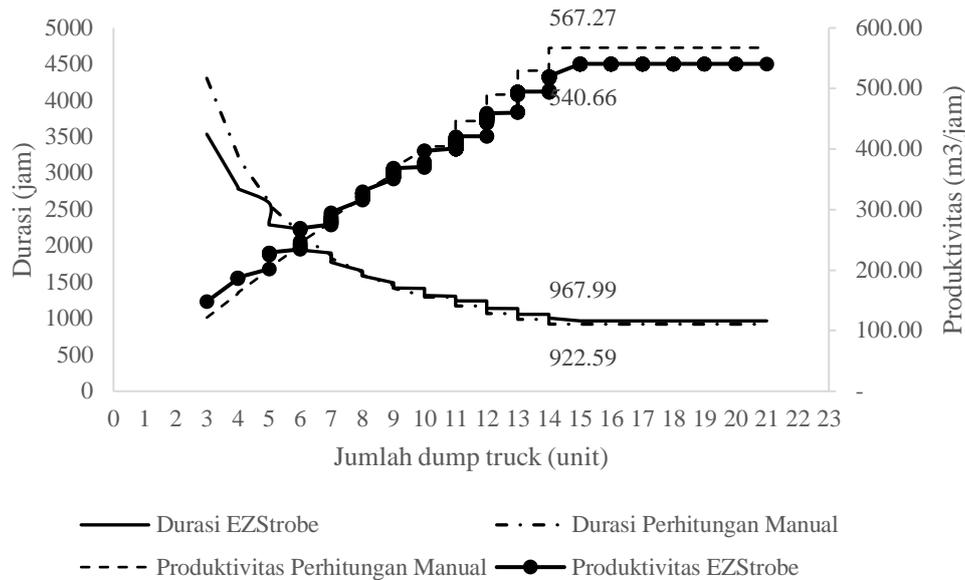


Gambar 3. Model EZStrobe pekerjaan galian dengan simulasi diskrit.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan dengan membandingkan analisis manual dengan hasil simulasi EZStrobe, yang tercantum pada Gambar 4. berikut ini:



Gambar 4. Grafik hasil verifikasi model EZStrobe dengan analisis manual.

Pada Gambar 4. Merupakan grafik hubungan antara jumlah dump truck dengan durasi kerja dan produktivitas pemindahan tanah. Kurva durasi EZStrobe dan durasi perhitungan manual memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah dump truck mengurangi durasi pekerjaan hingga mencapai titik stabil. Sementara itu, kurva produktivitas EZStrobe dan produktivitas perhitungan manual menunjukkan peningkatan produktivitas seiring bertambahnya jumlah dump truck sebelum akhirnya mencapai kapasitas maksimal (titik stabil). Keselarasan tren antara kedua metode ini membuktikan bahwa model EZStrobe telah terverifikasi dengan baik.

3.2 Validasi Model

Metode validasi dilakukan dengan membandingkan rata-rata durasi pekerjaan galian dengan durasi yang diperoleh dari pemodelan EZStrobe, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2 berikut ini:

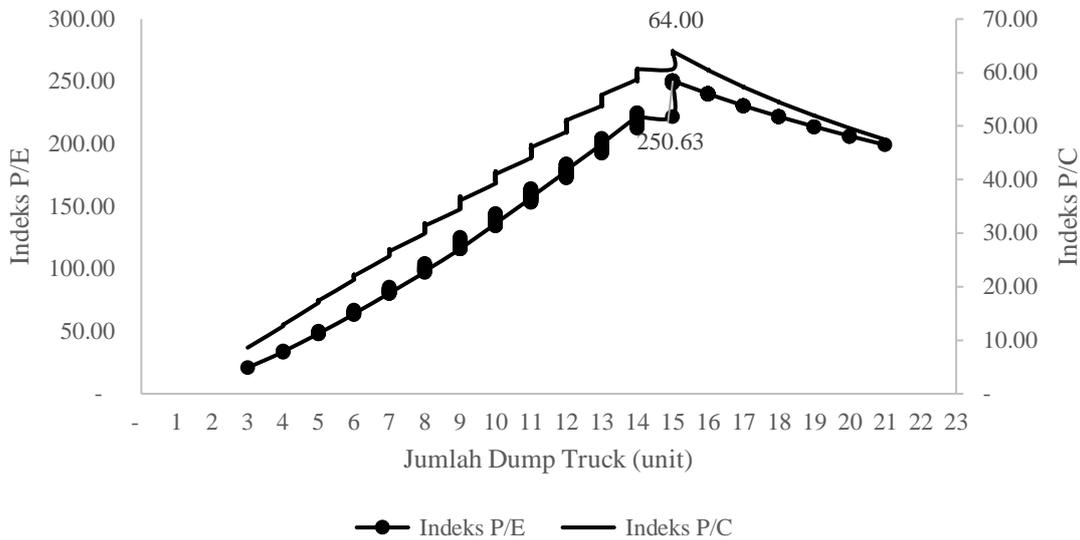
Tabel 2. Validasi pemodelan EStrobe dengan analisis manual.

No	Lokasi (Station)	Estimasi Volume Tanah (m3)	Analisis Manual		Simulasi EZStrobe (running 10x)		Error (%)
			Durasi Real (jam)	Produktivitas (m3/jam)	Durasi Simulasi (jam)	Produktivitas (m3/jam)	
1	01	308	0.85	363.86	0.89	346.01	5.08
	02						
	03						
2	01	1,485	4.08	363.86	4.02	369.50	1.53
	02						
	03						
3	01	1.386	3.86	372.85	4.02	369.50	7.52
	02						
	03						
4	01	275	0.96	300.52	0.95	291.36	3.24
	02						
	03						
5	01	4,356	11.23	397.43	11.61	375.22	4.49
	02						
	03						
Rata-rata			4.10		4.30		3.98

Simulasi dijalankan sebanyak 10 kali lalu hasil analisis diambil rata-rata. Analisis di atas didapatkan pada hari pertama dan ke empat nilai *error* melebihi 5%. Namun secara keseluruhan, nilai rata-rata *error* sebesar 3.98% dimana nilai ini sesuai dengan syarat kurang dari 5%.

3.3 Analisis Indeks Hubungan Produktivitas dengan Biaya dan Emisi Karbon

Pada Gambar 4 menunjukkan hasil analisis indeks produktivitas dengan *cost* (P/C) dengan nilai 64.00 dan indeks produktivitas dengan emisi (P/E) dengan nilai 250.63. Keduanya meningkat seiring bertambahnya jumlah dump truck, mencapai nilai optimal pada 15 unit dump truck. Setelah itu, kedua indeks mengalami penurunan. Optimasi ini bermanfaat dalam menekan biaya operasional dan mengurangi emisi, sehingga meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan kerja. Hasil simulasi pada setiap skenario jumlah dump truck memiliki beberapa nilai indeks mengingat dalam setiap skenario tersebut dilakukan setidaknya 7 kombinasi dump truck di berbagai *station*.



Gambar 4. Kurva produktivitas terhadap biaya (P/C) dan produktivitas terhadap emisi (P/E).

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Model simulasi ini dikembangkan dalam penelitian ini berdasarkan data operasional alat berat yang mencakup > 300 siklus dump truck dan >700 siklus excavator, dengan estimasi jarak antara lokasi galian dan timbunan sejauh ± 600 meter. Variasi durasi aktivitas alat berat disesuaikan dengan parameter masukan yang mencerminkan kondisi kerja aktual sehingga menghasilkan distribusi waktu yang beragam. Analisis data dilakukan menggunakan *Input Analyzer* dengan pemilihan nilai *square error* terkecil untuk memastikan akurasi pemodelan.

Hasil verifikasi model dilakukan dengan membandingkan analisis produktivitas dan durasi secara manual dengan hasil pemodelan. Didapatkan nilai *error* mencapai titik stabil pada jumlah dump truck yang optimal sebanyak 15 unit, dimana hasil optimasi tersebut memungkinkan penggunaan sumber daya yang lebih efisien, meningkatkan produktivitas, menekan biaya operasional dan mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, hubungan antara produktivitas dan biaya menghasilkan indeks efisiensi 64.00, sementara hubungan antara produktivitas dan emisi karbon menghasilkan indeks 250.63. Dengan tingkat kesalahan validasi model sebesar 3.98%, hasil ini membuktikan bahwa model simulasi mampu merepresentasikan kinerja alat berat secara konsisten dalam pekerjaan galian. Oleh karena itu, model ini dapat dijadikan acuan untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya, serta meminimalkan dampak lingkungan dalam pekerjaan konstruksi.

Penelitian ini memberikan dasar untuk optimasi alat berat, khususnya excavator dan dump truck, dengan mempertimbangkan berbagai kriteria, yaitu produktivitas, biaya, dan emisi karbon. Untuk penelitian selanjutnya, diharapkan ada pembahasan mengenai penentuan bobot pada masing-masing kriteria tersebut agar dapat membantu dalam menentukan prioritas optimasi alat berat. Selain itu, pengembangan model dengan mempertimbangkan beragam jenis dan kapasitas alat berat juga diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih komprehensif.

REFERENSI

- Ahmad, F. salam. (2022). "Dampak pembangunan jalan tol trans jawa terhadap pertumbuhan ekonomi di jawa tengah." *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Pembangunan*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.29244/jekp.11.1.2022.1-18>
- Alsakka, F., Khalife, S., Darwish, M., Al-Hussein, M., & Mohamed, Y. (2020). "Deploying discrete-event simulation and continuous improvement to increase production rate in a modular construction facility." *IEEE Press*.

- Amaran, S., Sahinidis, N. V., Sharda, B., & Bury, S. J. (2016). "Simulation optimization: a review of algorithms and applications." *Annals of Operations Research*, 240(1), 351–380. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2019-x>
- Andani, I. G. A., Geurs, K., & Puello, L. L. P. (2019). "Effects of toll road construction on local road projects in indonesia." *Journal of Transport and Land Use*, 12(1), 179–199. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1258>
- Hong, B., & Lü, L. (2022). "Assessment of emissions and energy consumption for construction machinery in earthwork activities by incorporating real-world measurement and discrete-event simulation." *Sustainability (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095326>
- Indrawan, I. E., Handayani, T. N., & Marleni, N. N. N. (2024). "Permodelan produktivitas alat berat dalam proses pemindahan tanah menggunakan ezstroke sebagai inisiasi optimalisasi biaya konstruksi dan emisi karbon." *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur*.
- Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM, D., & Energi -Sub Bidang Ketenagalistrikan, B. (2018). "Pedoman penghitungan dan pelaporan inventarisasi gas rumah kaca." *Direktorat Jendral Ketenagalistrikan*.
- Jian, N., & Henderson, S. G. (2015). "An introduction to simulation optimization." *IEEE*.
- Muthaher, A. M. M., Nugroho, A. S. B., & Aminullah, A. (2021). "Penggunaan simulasi komputer untuk optimalisasi kebutuhan alat berat pekerjaan pemindahan tanah." *Rekayasa Sipil*, 15.
- Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., & Shapira, A. (2024). "Construction planning, equipment, and methods." Mc Graw Hill (Ed.), *Construction Planning, Equipment, and Methods* (10 ed., hlm. 179–223).
- Shankar, A. U. (1991). "Discrete-event simulation."
- Zankoul, E., Khoury, H., & Awwad, R. (2015). "Evaluation of agent-based and discrete-event simulation for modeling construction earthmoving operations." *32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining: Connected to the Future, Proceedings*. <https://doi.org/10.22260/isarc2015/0014>