

PENGGUNAAN SIMULASI KOMPUTER UNTUK OPTIMALISASI KEBUTUHAN ALAT BERAT PEKERJAAN PEMINDAHAN TANAH

Andi Muflih Marsuq Muthaher, Arief Setiawan Budi Nugroho^{*}, Akhmad Aminullah

Departemen Teknik Sipil & Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

^{*}Korespondensi: arief_sbn@ugm.ac.id

ABSTRACT

Earthmoving work is often performed based on simple calculation and experience. This practice may work on a small project. However, for a big project in which a large excavation volume must be accomplished, managing the work become more complex. Some different equipment in various types and sizes need to be assigned. Project managers should determine the best combination of equipment with the correct amount to achieve a satisfactory result. This research was conducted to optimize the productivity-cost index in earthmoving works using a discrete event simulation (DES) analysis in four different schemes. An underpass project in Yogyakarta was used as the case study. The optimal combination of equipment was determined by the highest value of the productivity-cost index. The result shows that the highest productivity-cost index of 18.22 was achieved by the combination of four big excavators and 90 small trucks (2E4 90D1). It offered a better productivity-cost index compare to the contractor's existing equipment combination which could only reach a productivity-cost index of 5.3.

Keywords: *Discrete event simulation, earthmoving, productivity-cost index, optimization in construction*

1. PENDAHULUAN

Pekerjaan pemindahan tanah merupakan pekerjaan dengan siklus kerja berulang yang menggunakan peralatan mahal dan volume kerja yang besar [1]. Beberapa kombinasi pengulangan dari serangkaian urutan logis serta saling ketergantungan antara masing-masing alat berat seperti *excavator*, *truck*, *dozer* dan pematik umumnya dilakukan [2].

Pada pekerjaan pemindahan tanah dengan volume relatif besar dan waktu penyelesaian pekerjaan yang ketat, untuk memperoleh hasil yang optimal, setiap *project manager* dituntut untuk dapat memperhitungkan kebutuhan alat-alat berat dalam berbagai kemungkinan kombinasi dan distribusi. Namun pada praktiknya tidak jarang analisis kebutuhan alat berat hanya didasarkan pada tingkat produksi rata-rata dan pengalaman pekerjaan serupa yang pernah dikerjakan sebelumnya [3]. Kondisi ini berakibat luaran hasil perencanaan tidak dapat merepresentasikan kondisi riil di lapangan.

Persamaan sederhana operasi alat berat yang digunakan dalam memperhitungkan produktivitas pekerjaan pemindahan tanah bagaimanapun terbatas hanya dapat digunakan untuk kondisi-kondisi tertentu saja. Pada

kebanyakan kasus pekerjaan pemindahan tanah dengan volume besar dan kompleksitas tinggi, perencanaan luaran pekerjaan pemindahan tanah yang hanya mendasarkan persamaan-persamaan dasar operasi alat berat dipastikan akan memberikan hasil yang kurang akurat. Penerapan variasi kombinasi alat berat seperti penggunaan kombinasi alat berat dengan dua tipe *excavator* dengan kapasitas berbeda dipadu dengan satu jenis dump *truck* atau paduan dari dua jenis *truck* dengan satu tipe *excavator* atau pun penggunaan dua tipe *excavator* dipadu dengan dua jenis *truck* secara bersamaan yang masing-masing memiliki kapasitas berbeda memerlukan pendekatan simulasi untuk dapat memperoleh hasil yang lebih baik.

Dalam penelitian ini analisis produktivitas dengan pendekatan simulasi kegiatan pemindahan tanah menggunakan metode kejadian diskrit (*Discrete Event Simulation*) dan analisis Index produktivitas-biaya dilakukan untuk mengetahui hubungan produktivitas dan biaya pekerjaan berdasarkan beberapa variasi kombinasi alat berat. Studi kasus dilakukan pada Proyek Pembangunan *Underpass* Jalan Kaliurang Yogyakarta tahun 2019.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Simulasi proyek konstruksi

Dalam dunia konstruksi, simulasi menjadi bagian dalam riset operasi yang secara akademis telah mengalami perkembangan sangat signifikan selama dua decade terakhir [4]. Pemanfaatan metode simulasi menjadi sangat penting sehubungan keberadaan proyek konstruksi yang sangat kompleks, dinamis dan berisiko [5]. Pengelolaan proyek dengan metode *trial* dan *error* sangat berisiko menghasilkan keluaran yang tidak sesuai seperti yang diharapkan. Kondisi ini menjadikan penentuan kebutuhan alat dan metode analisis yang dapat mendukung proses pengambilan keputusan tingkat lanjut sangat dibutuhkan [6].

2.2 Simulasi dengan model diskrit

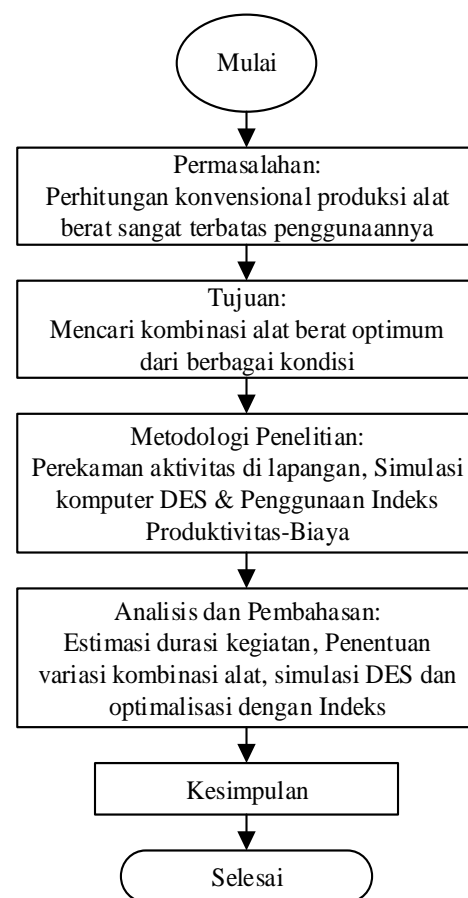
Discrete event simulation (DES) merupakan salah satu metode dalam dunia pemodelan dan simulasi (*modeling and simulation*) yang bertujuan menguji operasi dunia nyata ke dalam realitas virtual [7]. DES memodelkan operasi sebuah sistem sebagai urutan kejadian dalam suatu urutan waktu. Beberapa contoh kejadian diskrit adalah seperti sistem produksi manufaktur, sistem transportasi jaringan lalu lintas perkotaan, sistem layanan rumah sakit, dan sistem komunikasi jaringan nirkabel, dll [8].

3. METODE PENELITIAN

Studi kasus dilakukan pada pekerjaan pemindahan tanah area terbuka (*ramp underpass*) Proyek Pembangunan *Underpass* Kaliurang Yogyakarta. Pekerjaan pemindahan tanah area *box underpass* tidak dilakukan sehubungan area tersebut menerapkan metode pekerjaan yang berbeda. Simulasi siklus kerja alat berat dilakukan untuk beberapa alternatif kombinasi alat gali (*excavator*) dan alat angkut (*truck*) guna mendapatkan kombinasi kedua jenis alat berat yang efektif ditinjau dari tingkat produktivitas dan biaya. Hasil simulasi selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengamatan di lapangan. Alur penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Data waktu siklus operasi alat-alat berat dikumpulkan berdasarkan 12 jam pengamatan dan perekaman pekerjaan pemindahan tanah pada area *ramp* sisi timur *underpass* selama beberapa hari. Hasil pengamatan memperoleh data waktu siklus *loading excavator* (PC 200 Kapasitas 1 m³) dan data waktu siklus *truck* (kapasitas 7 m³).

Waktu siklus operasi truk diukur berdasarkan waktu total operasi *truck* dari selesai proses muat hingga siap untuk proses pemuatan kembali. Selain data primer hasil perekaman langsung di lapangan, pengumpulan data sekunder berupa waktu dan jumlah *truck* harian yang masuk ke lokasi proyek dari petugas lapangan juga dilakukan. Data ini diperlukan untuk menghitung keberadaan jumlah *truck* per hari yang melakukan proses pemindahan tanah. Tercatat tidak kurang terdapat 35 unit *truck* dengan kapasitas bak 7 m³ dan dua unit *excavator* PC-200 dengan kapasitas muat 1m³ beroperasi per harinya.



Gambar 1. Alur Penelitian

Sementara itu data volume galian tanah yang dipindahkan dihitung berdasarkan dokumen Gambar Perencanaan pekerjaan galian tanah *ramp* sisi timur dan *ramp* sisi barat. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh volume galian tanah *ramp* sisi timur adalah sebesar 10.031 bcm (satuan volume tanah asli dalam m³) dan *ramp* sisi barat sebesar 10.792 bcm.

Tabel 1. Variasi Jenis Alat Berat

<i>Excavator</i>	ID	Kapasitas Teoretis (m ³)	Kapasitas terkoreksi (bcm)	Siklus (menit)	Biaya per jam (Rp x1000)
Komatsu PC-75 UU	E1	0,25	0,22	0,25	179,81
Komatsu PC120-6	E2	0,50	0,44	0,28	275,47
Komatsu PC200-7 ^{*)}	E3	1,00	0,89	0,33	401,73
Komatsu PC-300-LC 8	E4	1,50	1,33	0,36	634,69
Truck					
Toyota DYNA 130 HT*	D1	7,00	6,23	78,40	324,34
Hino FM Ranger 260 JD	D2	20,00	18,9	136,21	672,84

^{*)} alat berat yang digunakan di lapangan

3.1 Asumsi dan Batasan Pemodelan

Untuk mendapatkan kombinasi ukuran dan jumlah alat muat dan alat angkut paling optimal, simulasi pemodelan pekerjaan galian dan pemindahan tanah dilakukan dengan mempertimbangkan variasi ukuran dan jumlah *excavator* dan *truck* lainnya yang memungkinkan untuk digunakan di lapangan. Tipe *excavator* yang ditambahkan dalam simulasi mengacu pada tipe *excavator* dikaji pada penelitian Ramadhani tahun 2017 [9] tentang optimasi alat berat pemindahan tanah pada proyek Jalan Tol Nganjuk-Kertosono. Sementara itu tipe *truck* yang ditambahkan mempertimbangkan ukuran *truck* yang memungkinkan untuk dipergunakan sehubungan kondisi *haul road* yang merupakan jalan umum, bukan *off road* seperti pada proyek-proyek jalan tol baru. Daftar alat berat yang dipergunakan dalam pemodelan ditunjukkan pada **Tabel 1**. Pemodelan alat berat pada yang bukan merupakan alat berat yang digunakan di lapangan diasumsikan dapat dipergunakan sesuai dengan kondisi yang ada. Data analisa biaya operasional alat mengacu pada pedoman Bina Marga Tahun 2017 [10], sedangkan siklus *excavator* per menit diperoleh dari Pedoman Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Menggunakan Alat Berat Departemen PU Tahun 1998 [11]. Estimasi siklus *truck* D2 diperoleh berdasarkan grafik *performance curve* dan *break performance* dalam Komatsu Handbook Edisi 27 [12] dengan dua menit asumsi estimasi waktu *dumping*. Sementara itu kapasitas *bucket excavator* dan *truck* disesuaikan dan dikoreksi dengan nilai *swelling factor* (faktor kembang tanah) tanah di lapangan sebesar 12% yang diperoleh berdasarkan informasi dari Konsultan Geoteknik.

3.2 Skema Pemodelan

Pemodelan dilakukan untuk membangun simulasi kombinasi operasi alat muat dan alat angkut dalam beberapa variasi. Simulasi dilakukan menggunakan *plug-in EZTROBE* yang ditempel

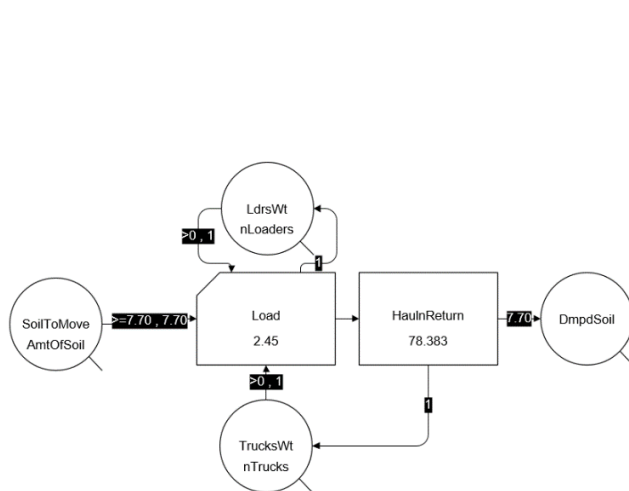
pada aplikasi *Microsoft Visio*. Simulasi dibuat dalam empat skema model yang berbeda. Skema-I berupa model sederhana yang selanjutnya menjadi acuan dalam pengembangan Skema-II, Skema-III dan Skema IV. Dalam **Tabel 2** ditampilkan daftar kombinasi pada tiap skema di mana nilai *n* adalah jumlah unit *truck* yang disimulasikan.

Tabel 2. Kombinasi Alat Berat

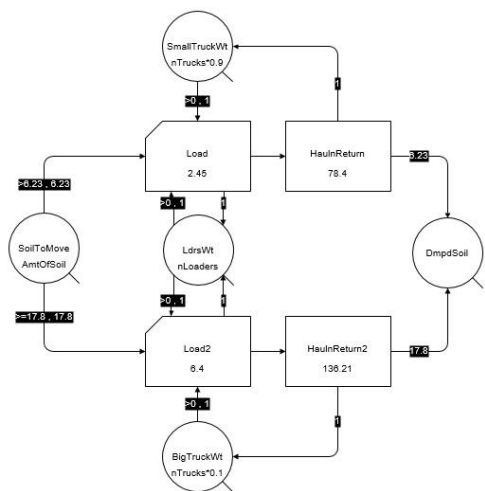
Skema-I	Skema-II	Skema-III	Skema-IV
E1 nD1	E1 nD1 nD2	E1 E2 nD1	E1 E2 nD1 nD2
E2 nD1	E2 nD1 nD2	E1 E3 nD1	E1 E3 nD1 nD2
E3 nD1	E3 nD1 nD2	E1 E4 nD1	E1 E4 nD1 nD2
E4 nD1	E4 nD1 nD2	E2 E3 nD1	E2 E3 nD1 nD2
E1 nD2		E2 E4 nD1	E2 E4 nD1 nD2
E2 nD2		E3 E4 nD1	E3 E4 nD1 nD2
E3 nD2		E1 E2 nD2	
E4 nD2		E1 E3 nD2	
		E1 E4 nD2	
		E2 E3 nD2	
		E2 E4 nD2	
		E3 E4 nD2	

Skema-I adalah pemodelan sederhana yang mengakomodasi situasi di mana hanya terdapat satu jenis *excavator* dan satu jenis *truck* yang digunakan. Skema-I mengakomodasi dan mengevaluasi operasi kombinasi alat berat di lapangan di mana dua unit *excavator* tipe PC-200 di dukung 35 *truck* kapasitas 7 m³. Model Skema-I ditampilkan pada **Gambar 2 (a)**.

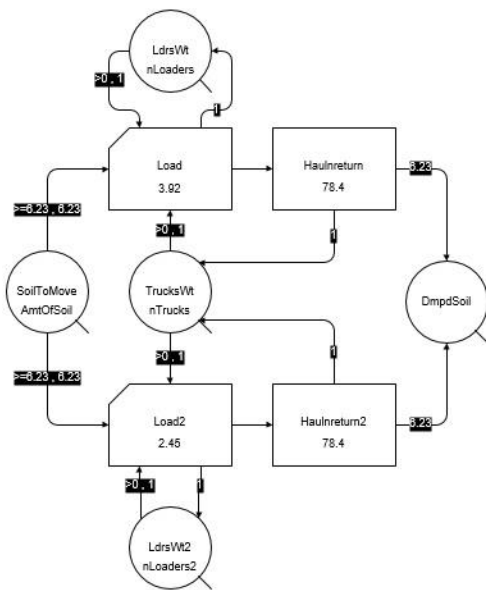
Berbeda dengan Skema-I, Skema-II menyajikan model pada situasi di mana terdapat dua jenis *truck* yang terdiri dari *truck* kecil (*small truck*) dan *truck* besar (*big truck*). Kedua jenis *truck* tersebut dilayani oleh satu unit *excavator*. Skema ini merupakan pengembangan pemodelan yang tidak diterapkan di lapangan.



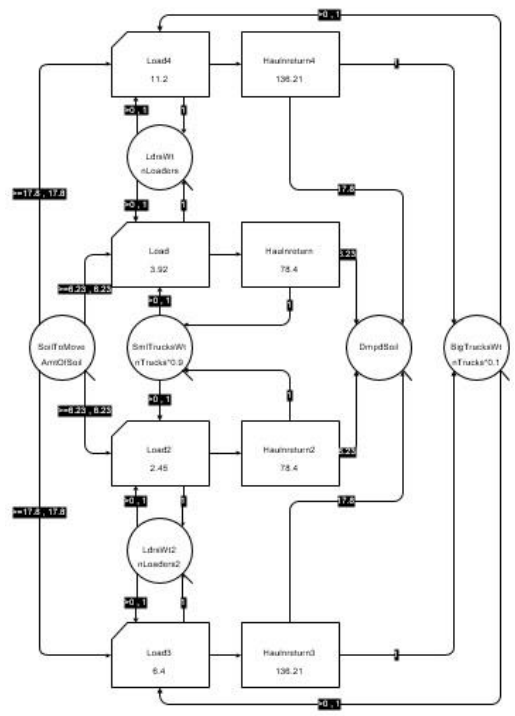
(a) Skema-I (1 tipe excavator & 1 tipe truck)



(b) Skema-II (1 tipe excavator & 2 tipe truck)



(c) Skema-III (2 tipe excavator & 1 tipe truck)



(d) Skema-IV (2 tipe excavator & 2 tipe truck)

Gambar 2. Skema pemodelan

Model mengilustrasikan kondisi di mana suatu operasi pekerjaan pemindahan tanah dilakukan oleh satu jenis alat muat dengan variasi dua tipe alat angkut yang berbeda. **Gambar 2 (b)** menunjukkan salah satu contoh pemodelan Skema-II di mana satu jenis excavator PC 200 yang melayani dua jenis truck dengan kapasitas masing-masing 7 m^3 dan 20 m^3 .

Pada Skema-III pemodelan operasi mengakomodasi kombinasi alat di mana dua unit excavator dengan kapasitas yang berbeda melayani beberapa truck dengan kapasitas yang sama. **Gambar 2 (c)** menunjukkan contoh

pemodelan di mana dua unit excavator yakni excavator PC 200 kapasitas 1 m^3 dan excavator PC 120 kapasitas $0,5 \text{ m}^3$ yang didukung oleh beberapa unit truck dengan kapasitas 7 m^3 .

Model yang terakhir, Skema-IV mempertimbangkan kondisi di mana terdapat dua jenis excavator dan dua jenis truck yang berbeda dan beroperasi saling mendukung dalam pelaksanaan pekerjaan pemindahan tanah. **Gambar 2 (d)** memperlihatkan contoh pemodelan Skema-IV di mana terdapat dua jenis excavator PC 200 dan PC 120 mendukung beberapa unit truck yang terdiri dari truck dengan

kapasitas 7 m³ dan 20 m³.

Sehubungan dengan pertimbangan faktor lokasi dan metode konstruksi, kombinasi jumlah alat muat pada keempat skema disesuaikan. Maksimal jumlah *Excavator* E1 adalah empat unit, *Excavator* E2 maksimal tiga unit sedangkan *Excavator* E3 dan *Excavator* E4 masing-masing maksimal berjumlah dua unit. Namun demikian khusus Skema-III dan Skema-IV yang menggunakan dua jenis *excavator*, jumlah total *excavator* yang dimodelkan dibatasi sebanyak tiga unit. Selain itu sehubungan pertimbangan manuver alat berat di lokasi pekerjaan, Skema-III dan Skema-IV juga membatasi jumlah *Excavator* E3 dan *Excavator* E4 masing-masing hanya satu unit.

Jumlah unit *truck* pada masing-masing skema dimodelkan mulai dari 10 unit dilanjutkan dengan penambahan setiap 10 unit pada model-model berikutnya hingga didapatkan jumlah optimal unit *truck* atau kondisi *balance number of truck* pada masing-masing skema tercapai. Khusus pada Skema-II dan Skema-IV, dua jenis *truck* yang digunakan disimulasikan dalam beberapa variasi proporsi jumlah. Sebagai contoh 10% *truck* D1 berbanding 90% *truck* D2 hingga sebaliknya 90% *truck* D1 berbanding 10% *truck* D2. Penggunaan persentase ini bertujuan untuk mendapatkan hasil optimal pemodelan yang lebih komprehensif yang mempertimbangkan variasi proporsi jumlah alat angkut.

Keempat skema pemodelan selanjutnya diuji coba terhadap seluruh kombinasi variasi kapasitas alat berat yang diusulkan menggunakan *plug-in* perangkat lunak EZSTROBE untuk menentukan kombinasi alat berat yang memberikan indeks produktivitas-biaya paling besar.

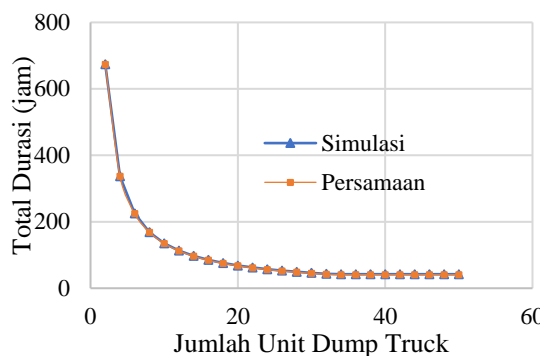
Pada Skema-I, saat simulasi dijalankan, *Queue Trckwait* melepaskan 1 unit *truck* ke dalam aktivitas *Combi Load* sesuai dengan durasi yang sudah ditentukan. Selanjutnya *Queue Soiltomove* melepaskan sejumlah volume tanah (sesuai kapasitas *truck*). Terakhir *Queue Ldrswait* melepaskan satu unit *excavator*. Setelah masing-masing *queue* melepaskan *resource*-nya, aktivitas *Combi Load* diaktifkan dan berjalan selama durasi yang telah ditentukan. Ketika *Combi Load* selesai, aktivitas *Normal Haulnreturn* diaktifkan dan berproses sesuai durasi yang telah ditentukan. Selanjutnya aktivitas *Queue DmpdSoil* terisi sesuai dengan kapasitas *truck* yang ada dan mengisi kembali *Queue TrcksWait*. Proses tersebut akan terus

berulang hingga *resource* dalam *Queue Soiltomove* habis dan simulasi berhenti.

Proses kerja model pada Skema-I pada umumnya berlaku sama untuk skema-skema yang lainnya. Pada Skema-II yang memiliki dua jenis *truck* dan satu jenis *excavator*, aktivitas *Combi Load* digandakan menjadi dua buah untuk mendukung proses *Queue SmallTruckWait* dan *Queue BigTruckWait*. Hal serupa untuk Skema-III yang menggunakan dua tipe *excavator* (*SmallExcavator* dan *BigExcavator*) dan satu tipe *truck*, selain aktivitas *Combi Load*, aktivitas *Queue LdrsWait* juga digandakan menjadi dua yakni *Queue SmallLdrsWait* dan *Queue BigLdrsWait*.

Sementara itu pada Skema-IV yang merupakan gabungan dari Skema-II dan Skema-III di mana dua tipe *excavator* dan dua tipe *truck* digunakan bersamaan, pemodelan Skema-IV melibatkan dua *Combi Load* dan dua *LdrsWait* yang masing-masing akan diaktifkan jika kondisi *resource*-nya terpenuhi.

Untuk memastikan bahwa operasi model pada setiap skema sudah sesuai dengan operasi pemindahan tanah sesungguhnya, verifikasi model dilakukan. Hasil verifikasi pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa *output* pemodelan telah sesuai dengan logika operasi pemindahan tanah yang dihitung menggunakan persamaan umum produktivitas alat berat, ditunjukkan dua garis kurva hasil analisis yang relatif berimpit.



Gambar 3. Hasil Verifikasi Pemodelan

Selain proses verifikasi model, proses validasi terhadap *margin of error* model juga dilakukan. Pada tahap validasi, hasil luaran simulasi dibandingkan dengan hasil olahan data sekunder di lapangan dan juga hasil perhitungan produksi konvensional alat berat menggunakan persamaan Peurifoy dkk (2006) berikut [13].

$$P = Q \times n \times 60 / t \times f k \dots \dots \dots (1)$$

$$P = Q \times 60/t \times f_k \dots \dots \dots (2)$$

di mana,

- P : produktivitas (m³ tanah asli/jam – bcm/jam)
- Q : kapasitas bak *truck* (m³ tanah lepas - lcm)
- n : jumlah unit *truck*
- t : waktu siklus *truck* (menit)
- f_k : faktor koreksi dari kondisi tanah lepas menjadi tanah asli (1/[1+fs]) di mana fs adalah faktor *swell*

Persamaan (1) adalah persamaan perhitungan produktivitas pemindahan tanah di mana *truck* mengontrol produksi. Hal ini terjadi ketika jumlah unit *truck* kurang dari kondisi *balance number of truck*. Sebaliknya Persamaan (2) adalah persamaan perhitungan produktivitas pemindahan tanah di mana *excavator* mengontrol produksi ketika jumlah unit *truck* yang digunakan melebihi kondisi *balance number of truck*. Hasil validasi model ditampilkan dalam **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Validasi Pemodelan EZTROBE

Sistem	Variabel Indikator		
	Durasi (jam)	Produktivitas (bcm/jam)	Biaya (Miliar Rupiah)
Riil	116,1	86,4	1088,6
Simulasi	101,3	99,3	908,2
Persamaan	83,7	119,8	747,3
Error Riil Vs Sim	Error Riil Vs Persamaan		
18,9%	25,0%		

Tabel 3 menunjukkan durasi riil pelaksanaan pekerjaan di lapangan, durasi pekerjaan hasil perhitungan berdasarkan persamaan umum produktivitas alat berat dan durasi hasil pemodelan EZSTROBE. Perhitungan durasi pekerjaan berdasarkan persamaan umum alat berat memberikan nilai *error* sebesar 25% terhadap durasi riil. Pemodelan EZSTROBE dilakukan dengan mensimulasikan data primer hasil perekaman kerja *truck* dan *excavator* selama 8 hari dari total 12 hari pekerjaan pemindahan tanah, serta memperhitungkan waktu kerja non-efektif alat seperti waktu antrian ketika menunggu pengisian. Nilai *error* pemodelan EZSTROBE diperoleh sebesar 18,9%. Hasil ini menunjukkan bahwa pemodelan EZSTROBE dapat memberikan hasil yang lebih baik dan mendekati kondisi riil di lapangan dibanding perhitungan menggunakan persamaan umum produktivitas alat berat. Selanjutnya nilai *error* 18,9% digunakan sebagai faktor koreksi durasi pekerjaan hasil simulasi.

3.3 Perhitungan Waktu Muat *Excavator* dan *Round Trip Truck* Alternatif

Pendekatan perhitungan estimasi waktu siklus alat berat alternatif yang tidak digunakan di lapangan didasarkan data durasi waktu siklus *excavator* dan *truck* pada **Tabel 1**. Sementara itu hasil estimasi perhitungan waktu siklus muat (*loading time*) ketiga alternatif *excavator*: *Excavator E2*, *Excavator E3* dan *Excavator E4*; terhadap dua jenis *truck*: *truck D1* (7 m³) dan *truck D2* (20 m³), ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Waktu Muat Alternatif *Excavator*

<i>Truck</i>	Waktu muat (menit)			
	E1	E2	E3	E4
D1	7,0	3,9	2,2	1,8
D2	20,0	11,2	6,4	5,0

Berdasarkan hasil perhitungan pendekatan estimasi waktu muat (*loading time*) pada **Tabel 4** menunjukkan bahwa semakin besar ukuran *bucket excavator* akan memperpendek waktu muat dan demikian sebaliknya.

Analisis durasi *haul* dan *return truck* dilakukan berdasarkan grafik *performance curve* dan *break performance* dalam Komatsu Handbook Edisi 27. Berdasarkan kurva *truck HD 255-5* yang memiliki spesifikasi berat kosong hampir sama dengan *truck* alternatif, dengan mengasumsikan *dumping time* dua menit, diperoleh durasi waktu siklus *haul* dan *return truck* sebesar 136,21 menit.

3.4 Penentuan kombinasi optimal

Analisis indeks dilakukan untuk menentukan variasi kombinasi paling optimal alat berat. Analisis indeks produktivitas terhadap biaya disajikan untuk mengetahui sejauh mana kombinasi alat berat memberikan gambaran perubahan produktivitas terhadap variabel biaya total pekerjaan. Perhitungan nilai indeks rasio produktivitas terhadap biaya dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$Idx - P/B = \frac{P}{B} \times 1.000.000.000 \dots \dots \dots (3)$$

di mana,

- P : Total produktivitas pemindahan (bcm/jam)
- B : Total biaya operasional (Rp)
- Idx-P/B : Indeks produktivitas-biaya

Nilai pengali sebesar satu miliar pada Persamaan (3) dimaksudkan agar nilai indeks

mempunyai rentang skala antara 0 s.d. 100. Kondisi optimal di dapat jika kombinasi alat berat dapat memberikan produktivitas kerja paling tinggi dengan biaya paling rendah yang mana kondisi tersebut dapat diketahui berdasarkan nilai Idx-P/B terbesar dari variasi pemodelan yang ada.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan kurva indeks produktivitas terhadap biaya pekerjaan seluruh kombinasi alat berat sesuai dengan empat skema kombinasi. Pada kurva terlihat bahwa besaran nilai indeks meningkat seiring penambahan jumlah *truck*. Pada titik puncak di mana *balance number of truck* tercapai, nilai indeks mengalami penurunan. Penambahan jumlah *truck* di atas kondisi *balance* tidak memberikan pengaruh peningkatan produktivitas yang dihasilkan sehubungan produktivitas pekerjaan pemindahan tanah dikendalikan oleh produktivitas *excavator* yang tersedia. Sebaliknya penambahan jumlah *truck* di atas kondisi *balance* hanya akan membuat biaya sewa *truck* terus meningkat. Peningkatan jumlah biaya sewa alat berat yang tidak disertai dengan peningkatan produktivitas mengakibatkan nilai indeks produktivitas-biaya menurun.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Skema-I dengan kombinasi 2E4 90D1 merupakan kombinasi paling ideal yang memberikan indeks produktivitas-biaya tertinggi dibanding dengan kombinasi yang lain. Dengan mempertimbangkan koreksi nilai *error* sebesar 18,9% berdasarkan hasil validasi, kombinasi 2E4 90D1 memberikan nilai indeks sebesar 18,22. Sementara itu kombinasi alat berat yang digunakan di lapangan (Skema-I 2E3 19D1) hanya memberikan nilai indeks produktivitas-

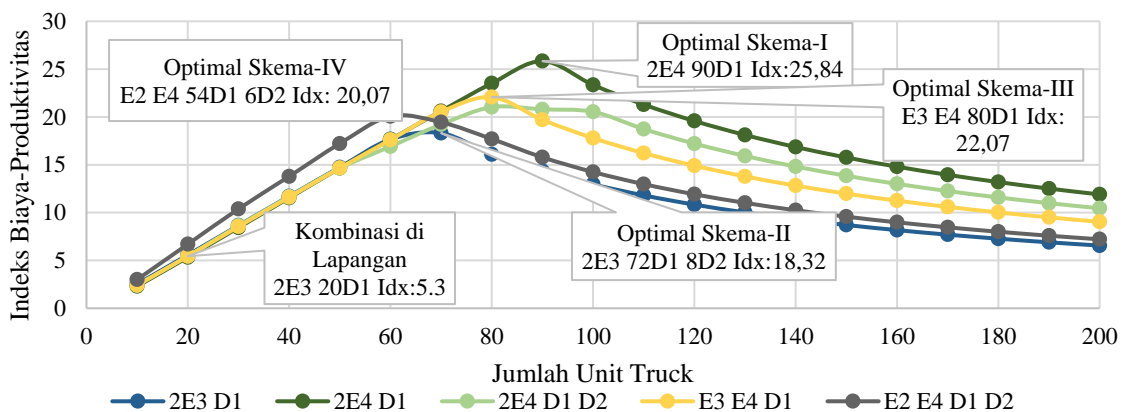
biaya sebesar 5,3. Rangkuman kombinasi paling optimal yang memiliki nilai indeks produktivitas-biaya tertinggi pada setiap skema pemodelan disajikan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5. Kombinasi Optimal *Excavator* dan *Truck*

Skema	Kombinasi	Estimasi Durasi (jam)	Estimasi Produktivitas (bcm/jam)	Estimasi Biaya (Rp.)	Indeks P/B
I	2E3 19D1*	237,5	87,0	1654,4	5,3
	2E4 90D1	61,2	340,0	1865,7	18,2
II	2E4 72D1 8D2	68,3	304,0	2049,3	14,8
III	E3 E4 80D1	70,3	296,0	1897,0	15,6
IV	E2 E4 54D1 6D2	88,6	235,0	1990,0	11,8

*) kombinasi yang digunakan di lapangan

Meski hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi 2E4 90D1 merupakan kombinasi alat berat paling ideal, namun dalam praktik penggunaannya perlu memperhatikan pengelolaan lokasi pekerjaan guna mengantisipasi kemungkinan-kemungkinan potensi kendala, seperti jarak antar lokasi galian antar kedua *excavator* dan area antrean *truck* ketika menunggu proses *loading*. Pengelolaan lokasi yang cermat sangat diperlukan mengingat ukuran *excavator* tipe E4 yang lebih besar dibandingkan tipe E3 yang digunakan di lapangan serta jumlah *truck* yang berada pada kondisi *balance*. Gangguan terhadap asumsi siklus kerja secara keseluruhan terganggu dan dapat menimbulkan permasalahan khususnya terkait manuver dan antrean alat.



Gambar 4. Kurva Indeks Produktivitas-Biaya

Berdasarkan hasil simulasi variasi kombinasi alat berat diketahui juga bahwa pada Skema-II dan IV yang menggunakan kombinasi truck dengan dua jenis ukuran, *truck* kecil dan *truck* besar, kombinasi alat angkut optimal tercapai pada perbandingan 90% *truck* kecil dan 10% *truck* besar. Hasil ini terlihat oleh kombinasi 2E4 72D1 8D2 pada Skema-II dan kombinasi E2 E4 54D1 6D2 pada Skema-IV. Kondisi ini terjadi sehubungan meski produktivitas *truck* kecil relatif lebih rendah dibanding dengan *big truck*, namun biaya sewa *truck* kecil yang lebih rendah menjadikan hasil simulasi memberikan indeks produktivitas-biaya *truck* kecil lebih baik dibanding penggunaan *truck* besar. Bagaimanapun, dalam praktik pelaksanaan di lapangan hal ini perlu ditinjau secara lebih detail dengan mempertimbangkan produktivitas nyata dan juga biaya sewa yang wajar sehingga hasil simulasi dapat lebih menggambarkan kondisi nyata.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Indeks produktivitas-biaya atas kinerja kombinasi alat gali dan alat angkut dalam pekerjaan pemindahan tanah sangat bermanfaat sebagai tolok ukur untuk menentukan tingkat keandalan kombinasi alat berat. Semakin tinggi nilai indeks mengindikasikan peningkatan tingkat produktivitas atau pun penurunan biaya pekerjaan.

Simulasi model terhadap penggunaan kombinasi alat gali dan alat angkut dalam variasi jumlah dan kombinasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi alat gali dengan kapasitas besar dipadukan dengan alat angkut berukuran kecil dalam jumlah yang banyak, Skema-1 2E4 90D1, merupakan kombinasi paling ideal yang dapat memberikan nilai indeks produktivitas-biaya paling tinggi. Dengan nilai indeks 18,2, Skema-1 2E4 90D1 memberikan lebih dari tiga kali lipat nilai indeks produktivitas-biaya dibandingkan dengan kombinasi alat berat yang dipergunakan di lapangan, Skema-1 2E3 19D1, yang hanya memberikan nilai indeks produktivitas-biaya sebesar 5,3.

Bagaimanapun pendekatan simulasi model deterministik yang sudah dilakukan pada penelitian ini menjadikan risiko akibat perbedaan asumsi ideal dalam simulasi model dengan kondisi riil di lapangan tidak dapat teridentifikasi. Untuk itu kajian simulasi model probabilistik diharapkan dapat menjawab dan memetakan potensi risiko yang dapat terjadi seperti pola

antrean alat angkut, yang berguna dalam perencanaan implementasi pengelolaan alat berat di lapangan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Shawki, K. M., Kilani, K., & Gomaa, M. A., Analysis of earthmoving systems using discrete-event simulation. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 533–540, 2015.
- [2] Parente, M., Correia, A. G., & Cortez, P., A Novel Integrated Optimization System for Earthwork Tasks. *Transportation Research Procedia*, 14, 3601–3610, 2016.
- [3] Yi, C., & Lu, M., A Simulation-based Earthmoving Fleet Optimization Platform (SEFOP) for truck/Excavator selection in rough grading project. *ISARC 2018 - 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things*, Isarc, 2018
- [4] Abourizk, S., Role of simulation in construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140–1153, 2010.
- [5] Abdelmegid, M. A., González, V. A., Poshdar, M., O’Sullivan, M., Walker, C. G., & Ying, F., Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. *Automation in Construction*, 111(June 2019), 103046, 2020.
- [6] Behzadan, A. H., Menassa, C. C., Tishman, J. L., & Pradhan, A. R., Enabling real time simulation of architecture, engineering, construction, and facility management (AEC/FM) systems: A review of formalism, model architecture, and data representation. *Journal of Information Technology in Construction*, 20, 1–23, 2015.
- [7] Wainer, G. A., & Mosterman, P. J., *Discrete-event modeling and simulation: Theory and applications*. In CRC Press. CRC Press, 2011
- [8] Kyu Choi, B., & Kang, D., *Modeling and Simulation of Discrete-Event Systems*. In Wiley. Wiley, 2013
- [9] Ramadhani A., *Optimalisasi Penggunaan Alat Berat Pada Pekerjaan Galian Tanah di Proyek Jalan Tol Nganjuk-Kertosono*, Publikasi Internal Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 2017.
- [10] Bina Marga, *Analisa Harga Satuan Pekerjaan*, Kementerian Pekerjaan Umum. 2017
- [11] Departemen Pekerjaan Umum. *Pedoman Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan dengan Menggunakan Alat Berat*. 1998
- [12] Komatsu, *Specification & Application Handbook* 27thEd, 2006.
- [13] Peurifoy, R.L., Schexnayder, C.J., Shapira, A. *Construction Planning, Equipment, and Methods* 7th Edition. McGraw Hill. 2006.