

Permodelan Produktivitas Alat Berat dalam Proses Pemindahan Tanah Menggunakan EZStrobe Sebagai Inisiasi Optimalisasi Biaya Konstruksi dan Emisi Karbon

I.E. Indrawan¹, T.N. Handayani^{1*}, N.N.N. Marleni¹

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

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

INTISARI

Salah satu komponen utama biaya konstruksi adalah alokasi kebutuhan alat berat yang erat kaitannya dengan jumlah dan produktivitas alat berat tersebut. Keputusan dalam membentuk strategi penggunaan alat berat ini menjadi hal yang krusial dalam kesuksesan proyek. Oleh karena itu, perlu adanya proses sistematis dalam menentukan alat berat yang tidak hanya memberikan hasil optimal, namun juga sesuai dengan kondisi di lapangan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan permodelan produktivitas alat berat pada pekerjaan galian dengan mengimplementasikan simulasi kejadian diskrit sebagai inisiasi untuk pembuatan model optimalisasi biaya konstruksi serta estimasi emisi karbon akibat proses konstruksi tersebut. Pengembangan model simulasi menggunakan perangkat lunak EZStrobe dengan memodelkan alat berat *excavator* yang melakukan penggalian dan *dump truck* melakukan pengangkutan. Variabel kunci berupa waktu siklus *dump truck* diambil dari data primer di lapangan sebanyak 133 kejadian pengangkutan digunakan untuk dasar simulasi. Hasil simulasi dengan perangkat lunak EZStrobe yang divalidasi dengan data di lapangan menunjukkan tingkat kesalahan sebesar 4,74%. Hal ini menunjukkan bahwa permodelan yang dibuat menghasilkan kinerja alat berat yang konsisten dan dapat diandalkan, sehingga memperkuat dasar penerapan perangkat lunak simulasi EZStrobe dengan integrasi simulasi kejadian diskrit khususnya dalam kegiatan pemindahan tanah. Hasil penelitian ini selanjutnya menjadi dasar permodelan untuk optimalisasi yang mempertimbangkan tidak hanya biaya konstruksi namun juga emisi karbon yang dihasilkan.

Kata kunci: produktivitas, pemindahan tanah, alat berat, kejadian diskrit, EZStrobe.

1 PENDAHULUAN

Produktivitas alat berat merupakan bagian penting dalam proyek konstruksi yang berkaitan erat dengan biaya konstruksi. Pemindahan tanah merupakan salah satu pekerjaan dalam proyek konstruksi yang cukup penting di dalam dunia konstruksi. Pada pekerjaan pemindahan tanah akan mempengaruhi biaya dan emisi dikarenakan semakin meningkatnya jumlah unit alat berat yang digunakan semakin bertambah pula biaya dan emisi yang dikeluarkan walaupun akan mempercepat pekerjaan, oleh karena itu diperlukan adanya optimasi dalam mengelola alat berat pada pekerjaan pemindahan tanah. Dalam optimasi secara konvensional, produktivitas alat berat dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas dan waktu saja, tanpa mempertimbangkan adanya waktu tunggu maupun variabel lain. Pekerjaan ini meliputi galian, pemindahan dan penempatan material tanah ke area pembuangan.

Dalam perencanaan alat dan sumber daya, diperlukan adopsi metode analitis yang mendukung proses pengambilan keputusan tingkat lanjut, yang diharapkan dapat merubah pengambilan keputusan tradisional yang berpusat pada manusia menjadi pengambilan keputusan yang berpusat pada simulasi. Perkembangan ini yang telah mengalami kemajuan signifikan dalam riset operasional selama dua dekade terakhir (Behzadan dkk., 2015; Abourizk, 2010). Adopsi pengembangan simulasi tersebut menjadi krusial mengingat proyek konstruksi yang sangat kompleks, dinamis, dan penuh resiko (Mutaher dkk., 2021; Abdelmegid dkk., 2020). Penanganan resiko tersebut dapat dilakukan melalui pemanfaatan data historis atau penilaian dari manajer risiko (Koulinas dkk., 2020). Dalam hal pekerjaan pemindahan tanah yang merupakan kombinasi pengulangan dari serangkaian urutan pekerjaan dimana masing masing alat berat seperti ekskavator dan truk memiliki ketergantungan satu sama lainnya, pekerjaan ini memiliki resiko yang mencakup kerusakan alat, cuaca buruk, dan kondisi lapangan yang tidak terduga. Selain itu, pekerjaan ini juga melibatkan peralatan yang mahal serta volume kerja yang besar sehingga perlu adanya simulasi yang tepat untuk mengakomodir ketidakpastian tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi konsep simulasi untuk melakukan pemodelan pekerjaan pemindahan tanah yang diharapkan dapat mengakomodasi ketidakpastian di lapangan. (Shawki dkk., 2015; Parente dkk., 2016).

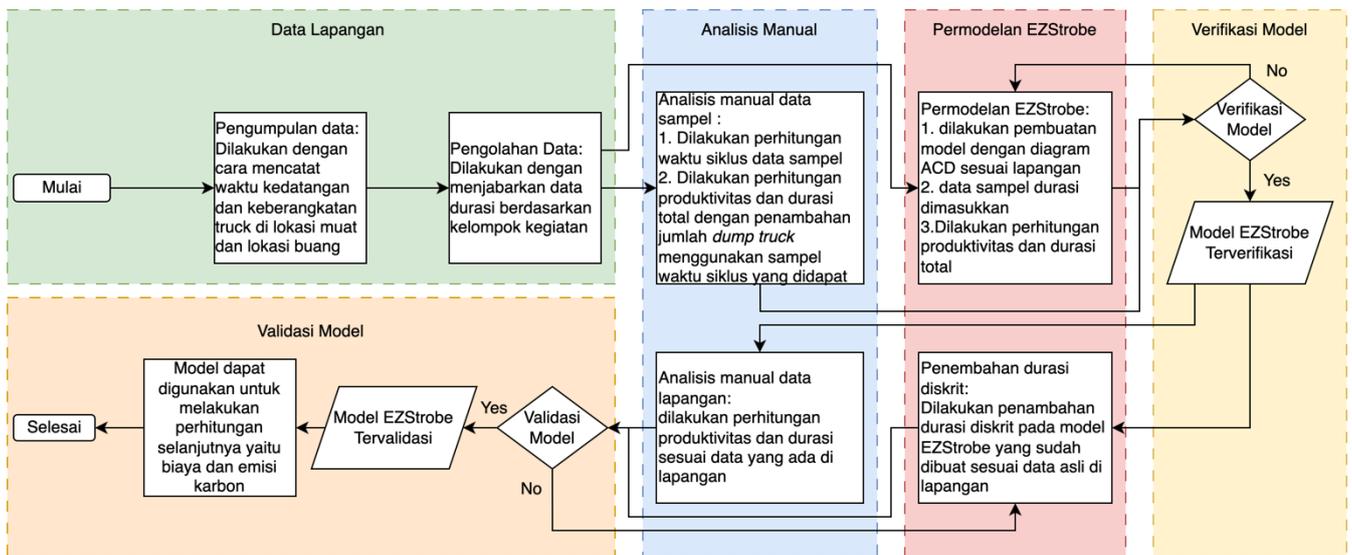
Discrete Event Simulation (DES) adalah sistem dinamis yang perilakunya identik dengan perubahan nilai status secara tiba-tiba berdasarkan penggunaan nilai diskrit yang diambil dari kumpulan nilai yang cukup banyak. Dalam dunia konstruksi simulasi peristiwa diskrit telah banyak digunakan dalam menganalisis operasi selama tiga dekade terakhir karena pengaruhnya yang besar pada optimalisasi biaya dan produktivitas (Shawki dkk., 2015). Salah satu contohnya adalah simulasi pekerjaan pemindahan tanah seperti penelitian yang dilakukan oleh Mutaher dkk (2021). DES dipilih sebagai metode yang memiliki kemampuan untuk melakukan eksperimen yang tidak dapat dilakukan pada sistem manufaktur nyata serta mampu merancang model simulasi yang dapat membantu dalam memperoleh pengetahuan dalam peningkatan sistem di lapangan (Sharma, 2015).

Penerapan DES dapat dilakukan melalui perangkat lunak EZStrobe yang merupakan sistem simulasi peristiwa diskrit berdasarkan pada Activity Cycle Diagram (ACD) (Martinez, 2001). EZStrobe menggunakan Stroboscope sebagai mesin simulasi dan menerapkan simulasi Three-Phase Activity Scanning. Penggunaan perangkat lunak ini diharapkan dapat mengakomodir ketidakpastian yang terjadi di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk membentuk permodelan produktivitas alat berat dalam proses pengangkutan galian dengan mengimplementasikan simulasi kejadian diskrit sebagai inisiasi untuk pembuatan model yang nantinya akan digunakan untuk optimalisasi biaya konstruksi serta nilai emisi karbon pada proses konstruksi tersebut. Konsep simulasi menggunakan DES dapat mengakomodir ketidakpastian yang ada di lapangan serta diagram ACD dapat menggambarkan proses riil di lapangan dengan baik. Konsep simulasi ini diimplementasikan melalui software EZStrobe yang didukung oleh Microsoft Visio yang dapat memodelkan urutan kejadian di lapangan sehingga optimalisasi dapat dilakukan dengan lebih cepat dan akurat sebagai inisiasi optimalisasi biaya konstruksi dan emisi karbon.

2 METODE PENELITIAN

Metode penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Data Lapangan

Pengambilan data di lapangan digunakan dengan pencatatan waktu kedatangan dan waktu keberangkatan *dump truck* pada lokasi pengambilan tanah dan pembuangan tanah. Dari data tersebut dapat diketahui waktu siklus pemindahan tanah serta jumlah tanah yang dipindahkan pada setiap harinya. Jumlah data yang didapatkan adalah sejumlah 223 data dan setelah dilakukan analisis, data yang akan digunakan dalam simulasi sejumlah 133 data. data siklus *truck* diambil selama 16 hari dengan jumlah siklus yang bergantung pada jumlah tanah yang akan dipindahkan pada hari tersebut dengan jarak tempuh lokasi proyek ke lokasi buang dan sebaliknya sejauh 23,7 km

2.2 Analisis Produktivitas Alat Berat secara Konvensional

Waktu siklus *dump truck* dapat diperhitungkan sebagai berikut

$$tI = t_{load} + t_{haul} + t_{dumping} + t_{return} \tag{1}$$

dimana, tI adalah siklus *truck* (menit), t_{load} adalah waktu loading (menit), t_{haul} adalah waktu perjalanan *truck* dari proyek ke lokasi buang (menit), $t_{dumping}$ adalah waktu bongkar tanah (menit), dan t_{return} adalah waktu perjalanan kembali *truck* ke lokasi proyek (menit).

Produksi alat-alat berat yang digunakan di lapangan dihitung berdasarkan persamaan yang menurut Peurifoy dkk., (2018). Perhitungan produksi pekerjaan pemindahan tanah dari kombinasi alat *excavator* dan *truck* diawali dengan evaluasi jumlah kestimbangan antara alat muat (*excavator*) dengan alat angkut (*truck*) menggunakan persamaan berikut ini:

$$BN = \frac{t_1}{t_2} \tag{2}$$

dimana, t_1 adalah siklus *truck* (menit), dan t_2 adalah siklus *excavator* (menit)

Sehubungan dengan jumlah unit *truck* yang lebih kecil dari kebutuhan jumlah *truck* untuk mencapai kondisi kesetimbangan, menjadikan jumlah *truck* mengendalikan nilai produksi pekerjaan pemindahan tanah dapat diperhitungkan berikut

$$P = Q \times n \times 60/t \times fk \tag{3}$$

dimana, P adalah produktivitas (m^3/jam), Q adalah kapasitas *dump truck* (m^3), n adalah jumlah *truck* (unit), t adalah siklus *truck* dan fk adalah faktor koreksi dari kondisi tanah lepas menjadi tanah asli

Perhitungan produktivitas *truck* di mana *excavator* mengontrol produksi jika menggunakan unit *truck* diatas *balance number of truck* adalah sebagai berikut

$$P = Q \times 60/t \times fk \tag{4}$$

dimana, P adalah produktivitas (m^3/jam), Q adalah kapasitas *dump truck* (m^3), n adalah jumlah *truck* (unit), t adalah siklus *truck* dan fk adalah faktor koreksi dari kondisi tanah lepas menjadi tanah asli

Sedangkan untuk perhitungan durasi pemindahan tanah

$$D = V/P \tag{5}$$

dimana, D adalah total durasi pemindahan tanah (jam), P adalah produktivitas (m^3/jam) dan V adalah volume total tanah yang dipindahkan (m^3).

Persamaan produksi *dump truck* ini menjadi acuan produktivitas pekerjaan pemindahan tanah secara total.

2.3 Permodelan EZStrobe

Dalam simulasi siklus pekerjaan pemindahan tanah dilakukan beberapa langkah seperti pembuatan diagram ACD, penentuan distribusi diskrit dan juga pembuatan model EZStrobe. Pembuatan *Activity Cycle Diagram* dapat dilihat pada Tabel 1. sebagai berikut.

Tabel 1. *Activity Cycle Diagram* (ACD) pekerjaan pemindahan tanah

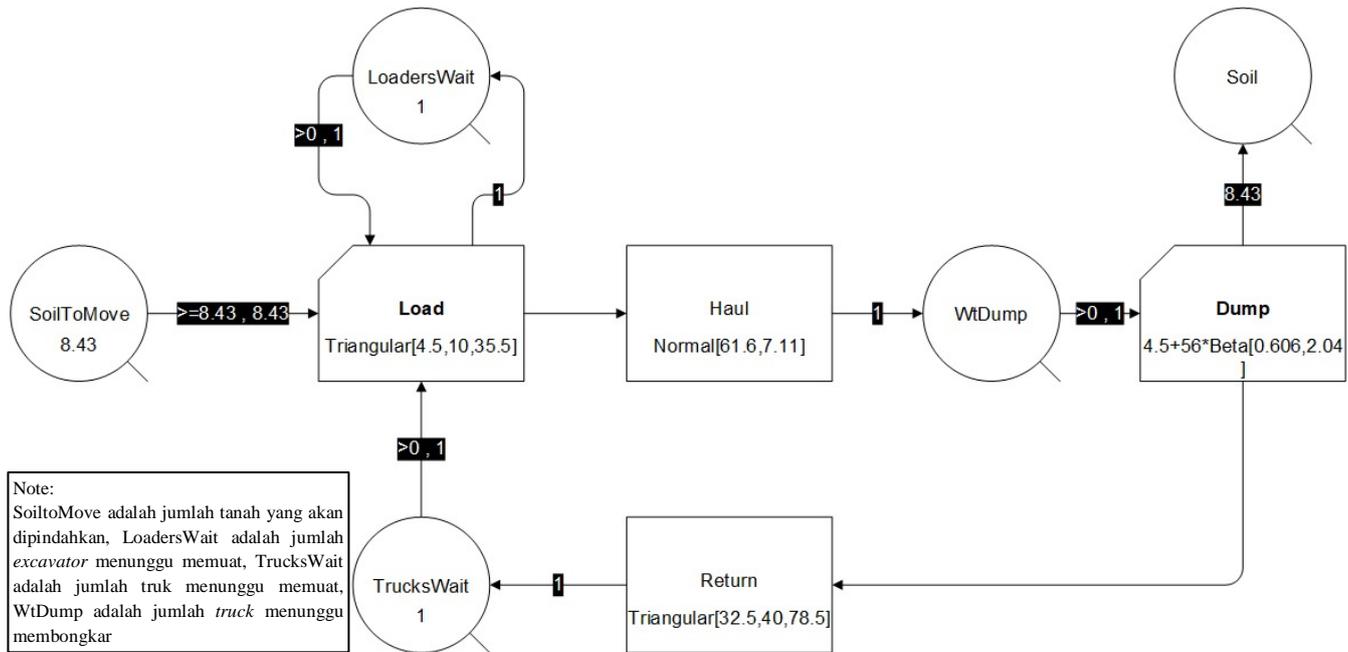
Kondisi yang dibutuhkan sebelum mulai	Aktivitas	Hasil
<i>Excavator</i> menunggu		<i>Excavator</i> menunggu
<i>Truck</i> kosong siap dimuat	Memuat	<i>Truck</i> telah terisi
Tersedia stock material yang ingin dipindahkan		<i>Truck</i> bersiap untuk mengangkut
<i>Truck</i> bersiap mengangkut	Mengangkut	<i>Truck</i> bersiap untuk membongkar
<i>Truck</i> bersiap membongkar		Material dibongkar
Material dibongkar	Membongkar	<i>Truck</i> kosong bersiap kembali
<i>Truck</i> kosong bersiap kembali	Kembali	<i>Truck</i> kosong menunggu untuk dimuat

Dari ACD diatas dapat diketahui bahwa terdapat beberapa aktivitas yang memiliki durasi seperti *loading*, *hauling*, *dumping* dan *return* berdasarkan data lapangan dari subbab 2.1 Mengingat durasi aktivitas tersebut memiliki ketidakpastian akibat banyaknya faktor eksternal, dibutuhkan fungsi distribusi probabilitas yang berbeda dikarenakan durasi setiap aktivitas terdiri dari sebaran data yang memiliki distribusi yang beragam, distribusi yang beragam pada aktivitas dilakukan analisis menggunakan *input analyzer*, distribusi dengan *square error* yang paling rendah yang akan digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Fungsi distribusi probabilitas simulasi diskrit

Aktivitas	Fungsi Distribusi Probabilitas	Jumlah Data	Square Error
Loading	Triangular [4.5, 10, 35.5]	133	0.1944
Haul	Normal [61.6, 7.11]	133	0.0683
Dumping	4.5 + 56 * Beta [0.606, 2.04]	133	0.1223
Return	Triangular [32.5, 40, 78.5]	133	0.1111

Setelah ditentukan model Activity Cycle Diagram dan fungsi distribusi dalam pekerjaan pemindahan tanah maka dapat dibuat model EZStrobe yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model EZStrobe pekerjaan pemindahan tanah dengan simulasi diskrit

Berdasarkan Gambar 2. SoiltoMove menunjukkan quarry yang berisi jumlah volume tanah yang akan dipindahkan. Tanah ini selanjutnya akan digali oleh excavator yang ditunjukkan dengan Queue LoadersWait yang harus terisi dengan jumlah excavator yang akan disimulasikan, begitu juga dengan Queue TrucksWait. Hasil galian akan ditampung oleh dump truck dalam Combi Load.

Ketika program dijalankan maka Queue TrucksWait akan melepas 1 unit truck kedalam aktivitas Combi Load yang telah memiliki durasi Triangular[4.5, 10, 35.5] yang berarti durasi berupa durasi diskrit. Setelah itu Queue SoiltoMove juga melepaskan sejumlah volume tanah sesuai dengan kapasitas dump truck. Setelah itu Queue ExcavatorWait juga melepaskan 1 unit excavator.

Setelah Combi Load selesai maka aktivitas Normal Haul diaktifkan dan akan memproses selama durasi Normal[61.6, 7.11]. Jika aktivitas Haul selesai maka aktivitas tersebut akan mengisi Queue WtDump sesuai jumlah dump truck yang telah menyelesaikan aktivitas Haul. Setelah Queue WtDump terisi selanjutnya Queue WtDump akan melepaskan resourcenya maka aktivitas Combi Dump diaktifkan dan berjalan selama durasi 4.5+56*Beta[0.606, 2.04].

Setelah Combi Dump selesai tanah yang berhasil dipindahkan akan mengisi Queue Soil sesuai dengan kapasitas dump truck yang ada dan juga aktivitas Normal Return diaktifkan dan akan memproses selama durasi Triangular[32.5, 40, 78.5]. Jika aktivitas Normal Return telah selesai maka dump truck akan kembali mengisi Queue TrucksWait.

Proses tersebut akan terus berulang hingga resource dalam Queue SoiltoMove tidak dapat lagi melepas sejumlah resource tanah yang tersedia. Dengan begitu simulasi akan berhenti dengan sendirinya karena resource yang tersedia tidak dapat mengaktifkan aktivitas Load.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

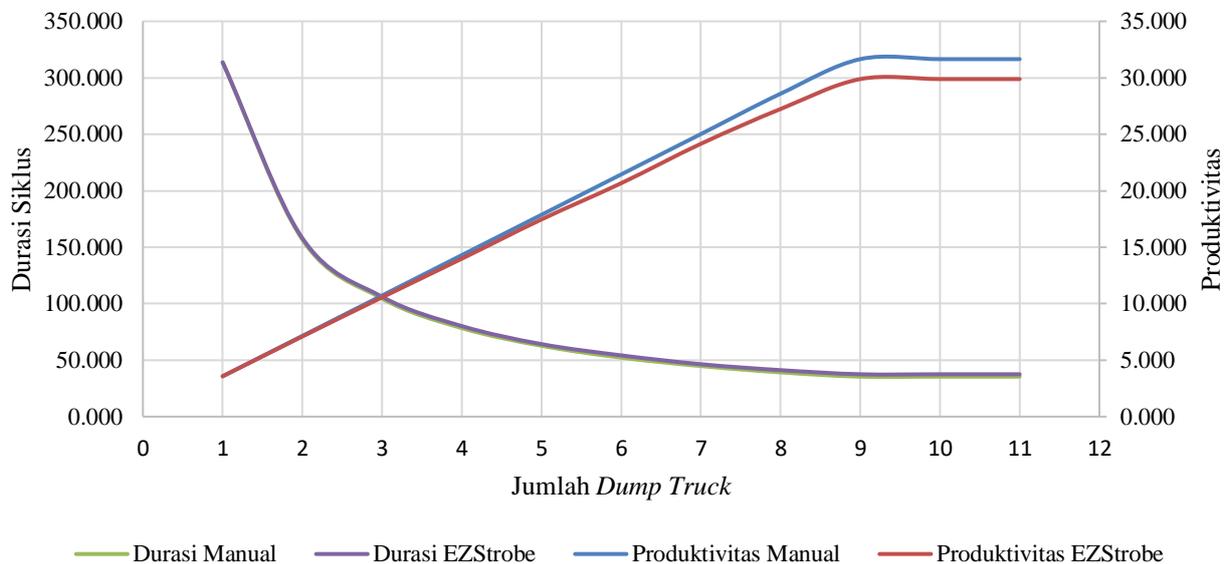
3.1 Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan perbandingan perhitungan konvensional produktivitas pekerjaan pemindahan tanah dengan hasil simulasi EZStrobe dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Verifikasi model EZStrobe dengan perhitungan manual

Jumlah DT unit	Perhitungan Manual		Permodelan EZStrobe		Error %
	Durasi jam	Produktivitas m ³ /jam	Durasi jam	Produktivitas m ³ /jam	
1	313.725	3.574	313.725	3.574	0.000%
2	156.862	7.148	158.042	7.094	0.746%
3	104.575	10.721	106.148	10.563	1.481%
4	78.431	14.295	80.200	13.980	2.206%
5	62.745	17.869	64.221	17.458	2.299%
6	52.287	21.443	54.253	20.666	3.623%
7	44.818	25.017	46.416	24.155	3.443%
8	39.216	28.590	41.166	27.236	4.737%
9	35.422	31.652	37.515	29.887	5.578%
10	35.422	31.652	37.515	29.887	5.578%
11	35.422	31.652	37.515	29.887	5.578%

Tabel 3. menunjukkan bahwa setiap peningkatan jumlah *truck* menghasilkan peningkatan tingkat deviasi/error antara Permodelan EZStrobe dengan perhitungan konvensional. Perbedaan ini terjadi mengingat permodelan EZStrobe dalam proses simulasinya mengakomodir waktu tunggu (*waiting*) *truck*, dimana semakin meningkat jumlah *truck* maka waktu tunggu *truck* juga semakin tinggi. Hal tersebut tidak diakomodir dalam perhitungan konvensional. Adapun berdasarkan data dalam Tabel 3 tersebut dapat dibuat kurva produksi dan durasi yang ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Kurva verifikasi produktivitas dan durasi pekerjaan pemindahan tanah EZStrobe

Gambar 3 menunjukkan kurva produktivitas dan durasi perhitungan konvensional dengan permodelan EZStrobe menunjukkan kurva yang berhimpit pada parameter durasi, sedangkan pada produktivitas memiliki trend naik dan mencapai titik optimalnya pada kombinasi dengan menggunakan 9 *dump truck*. Hal ini menunjukkan permodelan EZStrobe yang diusulkan sudah terverifikasi.

3.2 Validasi Model

Metode validasi dilakukan dengan membandingkan total durasi kegiatan pemindahan tanah yang ada di lapangan dengan permodelan EZStrobe yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Validasi model EZStrobe

Hari Ke	Kondisi di Lapangan			Perhitungan Manual			Hasil Simulasi		Error
	Jumlah <i>Excavator</i>	Jumlah Siklus <i>Dump Truck</i>	Jumlah DT*	Estimasi Volume Tanah(m ³)	Durasi Real (menit)	Produktivitas (m ³ /jam)	Durasi Simulasi (20x run)	Produktivitas (m ³ /jam)	
1	1	12	7	101,160	373	16,272	375,25715	16,175	0,61%
2	1	11	6	92,730	398	13,979	394,1633	14,115	0,96%
3	1	5	3	42,150	353	7,164	334,0483	7,571	5,37%
4	1	1	1	8,430	150	3,372	148,59415	3,404	0,94%
5	1	7	4	59,010	372	9,518	370,54905	9,555	0,39%
6	1	5	5	42,150	201	12,582	205,49875	12,307	2,24%
7	1	8	4	67,440	340	11,901	360,7746	11,216	6,11%
8	1	4	4	33,720	160	12,645	187,46615	10,792	17,17%
9	1	17	8	143,310	490	17,548	465,6053	18,468	4,98%
10	1	17	8	143,310	480	17,914	465,6053	18,468	3,00%
11	1	10	5	84,300	410	12,337	397,20295	12,734	3,12%
12	1	8	4	67,440	360	11,240	364,2746	11,108	1,19%
13	1	9	5	75,870	360	12,645	359,6448	12,657	0,10%
14	1	6	6	50,580	200	15,174	202,4317	14,992	1,22%
15	1	9	3	75,870	440	10,346	472,7011	9,630	7,43%
16	1	4	4	33,720	155	13,053	187,66335	10,781	21,07%
Rata - Rata					327,625		330,756		4,74%

*DT disini dapat diartikan sebagai *Dump Truck*

Hasil validasi model dilakukan menunjukkan bahwa perbedaan nilai produktivitas di lapangan dan permodelan EZStrobe memiliki nilai error rata-rata sebesar 4,74%. Nilai ini menunjukkan bahwa permodelan EZStrobe sudah tervalidasi. Model ini selanjutnya dapat digunakan untuk melakukan perhitungan biaya dan emisi.

4 KESIMPULAN

Permodelan dibuat berdasarkan data pengamatan di lapangan yang terdiri dari 133 data durasi aktivitas *excavator* dan *dump truck*, sedangkan jarak pemindahan tanah sejauh 23,6 km baik pada saat *haul* dan *return*. Permodelan ini dibuat dalam EZStrobe dengan ACD konvensional yang berdasarkan pada aktivitas proyek sehingga dapat mendekati kejadian nyata. Adapun dalam simulasinya distribusi dikrit dengan fungsi distribusi probabilitas yang berbeda dikarenakan durasi setiap aktivitas terdiri dari sebaran data yang memiliki distribusi yang beragam, distribusi yang beragam pada aktivitas dilakukan analisis menggunakan input analyzer, distribusi dengan square error yang paling rendah yang akan digunakan dalam analisis. Dari hasil verifikasi model yakni membandingkan perhitungan konvensional dan permodelan sehingga didapatkan nilai eror semakin tinggi sejalan dengan penambahan jumlah *dump truck*. Hasil dari tingkat error rata-rata sebesar 4,74% dapat menunjukkan bahwa permodelan dengan integrasi simulasi kejadian diskrit khususnya dalam kegiatan pemindahan tanah menghasilkan kinerja alat berat yang konsisten dan dapat diandalkan

Penelitian ini selanjutnya menjadi dasar permodelan untuk optimalisasi yang mempertimbangkan tidak hanya biaya konstruksi namun juga emisi karbon yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat mempersingkat pengambilan keputusan pada suatu proyek khususnya pada pekerjaan pemindahan tanah dengan akurasi yang cukup tinggi, namun tetap mempertimbangkan ketidakpastian yang terjadi di lapangan dengan menggunakan durasi diskrit.

REFERENSI

Abdelmegid, M.A., González, V.A., Poshdar, M., O'Sullivan, M., Walker, C.G., Ying, F., 2020. Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. *Autom Constr.* <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103046>

- Abourizk, S., 2010. Role of Simulation in Construction Engineering and Management. *J Constr Eng Manag.* <https://doi.org/10.1061/ASCECO.1943-7862.0000220>
- Behzadan, A.H., Menassa, C.C., Tishman, J.L., Pradhan, A.R., 2015. Enabling Real Time Simulation of Architecture, Engineering, Construction, and Facility Management (AEC/FM) System : a review of formalism, model architecture, and data presentation. *Journal of Information Technology in Construction* 20, 1–23.
- Koulinas, G.K., Xanthopoulos, A.S., Tsilipiras, T.T., Koulouriotis Dimitrios E., 2020. Schedule Delay Risk Analysis in Construction Project with a Simulation-Based Expert System. *Buildings.* <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10080134>
- Martinez, J.C., 2001. EZSTROBE - General - Purpose Simulation System Based on Activity Cycle Diagrams. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.*
- Mutaher, A.M.M., Nugroho, A.S.B., Aminullah, A., 2021. Penggunaan Simulasi Komputer untuk Optimalisasi Kebutuhan Alat Berat Pekerjaan Pemindahan Tanah. *Rekayasa Sipil* 15, 142–149.
- Parente, M., Correia, A.G., Cortez, P., 2016. A Novel Integrated Optimization System for Earthwork Tasks, dalam: *Transportation Research Procedia.* Elsevier B.V., hlm. 3601–3610. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.428>
- Peurifoy, R.L., Schexnayder, C.J., Shapira, A., 2018. *Construction Planning, Equipment, and Methods*, Ninth Edition, 9 ed. Mc Graw Hill.
- Sharma, P., 2015. Discrete-Event Simulation. *International Journal of Scientific & Technology Research* 4.
- Shawki, K.M., Kilani, K., Gomaa, M.A., 2015. Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation. *Alexandria Engineering Journal* 54, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.034>
- Silva, M., 2018. On the history of Discrete Event Systems. *Annu Rev Control* 45, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.03.004>