

OPTIMASI ALAT BERAT PADA PROYEK JALAN TOL PROBOLINGGO-BANYUWANGI STA 9+000 sd STA 14+000

Amanda Triastutik^{1*}, Suselo Utoyo²

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi¹, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang²

Email: triastutikamanda@gmail.com¹, suselo.utoyo@polinema.ac.id²

ABSTRAK

Pengerjaan proyek tol Probolinggo-Banyuwangi terdiri dari beberapa pekerjaan termasuk pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku. Untuk meminimalkan biaya pekerjaan, dilakukan optimasi penggunaan alat berat. Tujuannya meliputi perhitungan total biaya, pemilihan peralatan termurah, dan penentuan jumlah unit. Data yang digunakan mencakup potongan melintang STA 09+000 s/d 14+000, jenis, spesifikasi dan harga alat berat. Semua data diolah untuk memperoleh hasil perhitungan volume, perhitungan produktivitas tiap jenis alat, simulasi berbagai kombinasi alat berat, Semua data diolah untuk mendapatkan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa optimalisasi tersebut menghasilkan Pekerjaan Pembersihan Lahan menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 11,451,936.57, dengan kombinasi 1 Excavator tipe Komatsu Komatsu PC 300, 8 Dump Truck Mitsubishi FN 62F HD Lug, dan 4 Bulldozer D65P-12; Pekerjaan Galian menggunakan alternatif 2 dengan total biaya Rp 3,751,467.15, dengan kombinasi 1 Excavator Komatsu PC300-8M2, dan 3 Dump Truck Mitsubishi Fuso FN 62F HD Lug; Pekerjaan Timbunan menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 26,643,496.83, dengan kombinasi 3 Excavator Komatsu PC300-8M2, 11 Dump Truck Dump Truck Mitsubishi FN 62F HD Lug, 12 Motor Grader GD535-5, 3 Vibratory Roller Tipe Sakai, dan 11 Water Tank Truck Tipe Fuso Canter FE(5000 L); dan Pekerjaan Perkerasan Kaku menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 2,052,825.39, dengan kombinasi 1 Excavator tipe Komatsu PC 200, 1 Dump Truck Mitsubishi Fuso FN 62F HD Lug, dan 1 Slipform Paver Tipe Wirtgen 500.

Kata kunci : optimasi; alat berat; biaya; produktivitas

ABSTRACT

The construction of the Probolinggo-Banyuwangi toll road project consists of several tasks, including land clearing, excavation, embankment, and rigid pavement. To minimize project costs, the use of heavy equipment is optimized. The objectives include calculating total costs, selecting the cheapest equipment, and determining the number of units. The data used includes cross-sections from STA 09+000 to 14+000, types, specifications, and prices of heavy equipment. All data was processed to obtain volume calculations, productivity calculations for each type of equipment, and simulations of various heavy equipment combinations. All data was processed to obtain. The calculation results show that the optimization yields Land Clearing Work using alternative combination 4 with a total cost of Rp 11,451,936.57, consisting of 1 Komatsu PC 300 excavator, 8 Mitsubishi FN 62F HD Lug dump trucks, and 4 D65P-12 bulldozers; Excavation work using alternative 2 with a total cost of Rp 3,751,467.15, with a combination of 1 Komatsu PC300-8M2 excavator and 3 Mitsubishi Fuso FN 62F HD Lug dump trucks; Fill work using alternative combination 4 with a total cost of Rp 26,643,496.83, combining 3 Komatsu PC300-8M2 excavators, 11 Mitsubishi FN 62F HD Lug dump trucks, 12 GD535-5 motor graders, 3 Sakai-type vibratory rollers, and 11 Fuso Canter FE (5000 L) water tank trucks; and Rigid Pavement Work using alternative combination 4 with a total cost of Rp 2,052,825.39, using a combination of 1 Komatsu PC 200 excavator, 1 Mitsubishi Fuso FN 62F HD Lug dump truck, and 1 Wirtgen 500 slipform paver.

Keywords : optimization; heavy equipment; cost; productivity

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi mendorong peningkatan kebutuhan alat berat yang efisien dan tepat guna. Dalam proyek jalan tol seperti Proyek Tol Probolinggo–

Banyuwangi, alat berat seperti excavator, dump truck, motor grader, vibratory roller, dan water tank truck sangat berperan dalam pekerjaan galian, timbunan, dan perkerasan. Tanpa perencanaan yang tepat, penggunaan alat berat dapat

menyebabkan pemborosan waktu, biaya, dan penurunan kualitas pekerjaan.

Optimasi penggunaan alat berat merupakan langkah penting untuk menjamin tercapainya efisiensi biaya dan peningkatan produktivitas dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan analisis optimasi tersebut adalah metode *simpleks*, yaitu metode pemrograman linear yang dapat mengatur alokasi alat berat secara optimal sesuai batasan sumber daya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas metode ini. Admaja (2023) mengoptimasi alat berat pada proyek Tol Solo–Kertosono dan memperoleh kombinasi alat termurah. Penelitian Dewi (2023) pada proyek Tol Pasuruan–Probolinggo berhasil menemukan kombinasi alat paling efisien berdasarkan biaya. Sementara itu, Pradiptai (2020) mengaplikasikan metode *simpleks* pada proyek Tol Pandaan–Malang dengan hasil kombinasi alat optimum di berbagai segmen pekerjaan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan alat berat pada proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA 9+000 s.d. STA 14+000, dengan fokus pada efisiensi biaya dan penjadwalan alat menggunakan metode *simpleks*.

Dengan mempertimbangkan latar belakang serta permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, maka tujuan dari pembahasan ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung volume pekerjaan yang meliputi pekerjaan galian, timbunan, dan perkerasan kaku.
2. Menganalisis produktivitas serta menghitung biaya operasional dari masing-masing alat berat yang digunakan.
3. Menentukan kombinasi alat berat yang optimal untuk setiap jenis pekerjaan agar tercapai efisiensi waktu dan biaya.
4. Menghitung total biaya penggunaan alat berat pada pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku.

Menurut Nyoman Gunantara (2018) Optimasi yaitu proses mencari Solusi yang terbaik atau nilai optimal dari permasalahan optimasi. Permasalahan-permasalahan optimasi. Permasalahan - permasalahan optimasi tersebut ada yang mencari nilai maksimal atau nilai minimal.

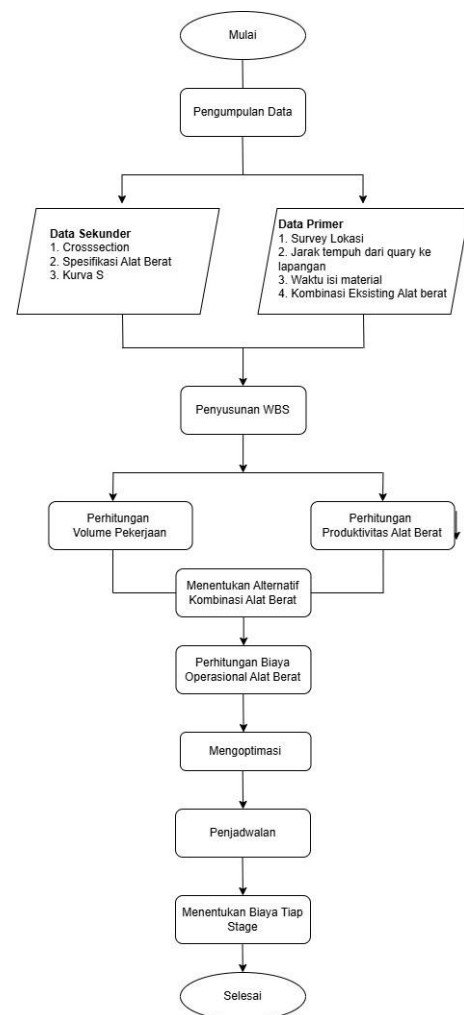
Menurut Siringoringo (2005), salah satu Teknik penentuan Solusi optimal yang digunakan dalam pemrograman linear adalah yang metode *simpleks*. Penentuan solusi optimal dilakukan dengan memeriksa titik ekstrim satu per satu dengan cara perhitungan iteratif. Sehingga penentuan solusi optimal dengan *simpleks* dilakukan tahap demi tahap, yang disebut dengan iterasi. Iterasi ke-1 hanya tergantung dari iterasi sebelumnya.

2. METODE

Pembahasan ini didasarkan pada data yang diambil dari Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 2, tepatnya pada STA 09+000 hingga STA 14+000 dengan panjang lintasan 5,000 km.

Data yang digunakan merupakan data sekunder, mencakup gambar *cross section*, ROW, harga sewa alat, volume masing-masing pekerjaan, serta kurva-S proyek.

Untuk memperoleh durasi pelaksanaan yang optimal, digunakan metode *simpleks* yang diolah dengan bantuan perangkat lunak LINDO. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uraian perhitungan biaya alat berat sebagai berikut:
Volume Pekerjaan

Dalam pelaksanaan pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA

9+000 hingga STA 14+000, perhitungan volume dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari gambar *cross section* (penampang melintang). Hasil dari perhitungan volume setiap jenis pekerjaan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**

Tabel 1 Volume Galian

NO	Pekerjaan	Volume	Unit
1	Pembersihan Lahan	64,002.92	m3
2	Galian	26	m3
3	Timbunan	12	m3
4	Perkerasan Kaku	27.4	m3

Sumber: Hasil Perhitungan

Metode Pelaksanaan

Pelaksanaan pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku dilakukan mengikuti rencana kerja serta ketentuan teknis yang berlaku di proyek. Urutan metode pelaksanaan tiap pekerjaan adalah sebagai berikut: Menggunakan excavator dan bulldozer untuk membersihkan area dari semak, pohon, akar, dan sampah, sehingga siap untuk pekerjaan tanah berikutnya.

1. **Pekerjaan Pembersihan Lahan** dimulai dengan kegiatan pengukuran dan pemasangan patok oleh tim surveyor, dilanjutkan dengan pembersihan vegetasi, pembongkaran bangunan lama, dan penebangan pohon. Seluruh material sisa pekerjaan diangkut menggunakan dump truck menuju area pembuangan yang telah disiapkan.
2. **Pekerjaan Galian** diawali dengan penentuan dan penandaan elevasi rencana, kemudian tanah digali menggunakan excavator, dimuat ke dalam dump truck, dan diangkut ke lokasi pembuangan sesuai rencana.
3. **Pekerjaan Timbunan** dilakukan dengan mendatangkan material dari *quarry* menggunakan dump truck, lalu disebar menggunakan motor grader, dipadatkan memakai vibratory roller, serta disiram air untuk membantu proses pemadatan.
4. **Pekerjaan Perkerasan Kaku** meliputi pembersihan permukaan lean concrete, pemasangan tulangan, plastic cor, crack inducer, dan bekisting, diikuti pengecoran beton setebal 30 cm. beton kemudian diratakan menggunakan slipform paver diberi air (grooving), dilakukan perawatan (water curing), dan dipotong sambungannya untuk mencegah retakan.

Produktivitas Alat Berat

Setiap jenis alat berat yang digunakan memiliki tingkat produktivitas yang berbeda-beda. Ringkasan perhitungan produktivitas untuk masing-masing alat tersebut terlampir pada **Tabel 2 - Tabel 5**.

Tabel 2. Rekap Produktivitas Alat Berat Pembersihan Lahan

No	Jenis Alat	Produktivitas	Satuan	Keterangan
1	EXC 1	377,79	m3/jam	

No	Jenis Alat	Produktivitas	Satuan	Keterangan
2	EXC 2	192,98	m3/jam	
3	DT 1	68,22	m3/jam	EXC 1
4	DT 1	56,46	m3/jam	EXC 2
5	DT 2	76,17	m3/jam	EXC 1
6	DT 2	61,80	m3/jam	EXC 2
7	BD 1	147,235	m3/jam	
8	BD 2	159,79	m3/jam	

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 3. Rekap Produktivitas Alat Berat Galian

No	Jenis Alat	Produktivitas	Satuan	Keterangan
1	EXC 1	377,79	m3/jam	
2	EXC 2	185,26	m3/jam	
3	DT 1	57,50	m3/jam	EXC 1
4	DT 1	48,30	m3/jam	EXC 2
5	DT 2	76,17	m3/jam	EXC 1
6	DT 2	61,80	m3/jam	EXC 2

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4. Rekap Produktivitas Alat Berat Timbunan

No	Jenis Alat	Produktivitas	Satuan	Keterangan
1	EXC 1	377,79	m3/jam	
2	EXC 2	304,78	m3/jam	
3	DT 1	68,84	m3/jam	EXC 1
4	DT 1	64,84	m3/jam	EXC 2
5	DT 2	76,17	m3/jam	EXC 1
6	DT 2	71,98	m3/jam	EXC 2
7	MG	69,29	m3/jam	
8	VR 1	713,89	m3/jam	
9	VR 2	414,34	m3/jam	
10	WTT	76,62	m3/jam	

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 5. Rekap Produktivitas Alat Berat Galian

No	Jenis Alat	Produktivitas	Satuan	Keterangan
1	EXC 1	51,52	m3/jam	
2	EXC 2	185,26	m3/jam	
3	DT 1	26,60	m3/jam	EXC 1
4	DT 1	48,30	m3/jam	EXC 2
5	DT 2	30,006	m3/jam	EXC 1
6	DT 2	60,82	m3/jam	EXC 2
7	SP	13,446		

Sumber: Hasil Perhitungan

Pembentukan Alternatif Kombinasi Alat Berat

Alternatif kombinasi alat berat disusun dengan mengacu pada berbagai jenis dan tipe alat sesuai dengan spesifikasi yang tercantum dalam *Katalog Alat Berat 2013* yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum. Penyusunan kombinasi ini merupakan bagian dari proses optimasi pemilihan alat berat yang bertujuan untuk memperoleh penggunaan alat yang paling efektif dan efisien pada Proyek

Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi STA 9+000 sd STA 14+000. Pertimbangan dalam penentuan alternatif kombinasi meliputi besarnya volume pekerjaan, keterbatasan luas area proyek, serta tingkat ketergantungan antar alat berat pada setiap jenis pekerjaan. Rincian alternatif kombinasi alat berat yang direncanakan disajikan pada **Tabel 6 - 9**.

Tabel 6. Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Perbersihan Lahan

No	Alternatif Kombinasi	Kode Kombinasi		
1	Kombinasi 1	EXC 1	DT 1	BD 1
2	Kombinasi 2	EXC 1	DT 1	BD 2
3	Kombinasi 3	EXC 1	DT 2	BD 1
4	Kombinasi 4	EXC 1	DT 2	BD 2
5	Kombinasi 5	EXC 2	DT 1	BD 1
6	Kombinasi 6	EXC 2	DT 1	BD 2
7	Kombinasi 7	EXC 2	DT 2	BD 1
8	Kombinasi 8	EXC 2	DT 2	BD 2

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 7. Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Galian

No	Alternatif Kombinasi	Kode Kombinasi	
1	Kombinasi 1	EXC 1	DT 1
2	Kombinasi 2	EXC 1	DT 2
3	Kombinasi 3	EXC 2	DT 1
4	Kombinasi 4	EXC 2	DT 2

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 8. Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Timbunan

Alternatif Kombinasi	Kode Kombinasi				
Kombinasi 1	EXC 1	DT 1	MG 1	VR 1	WTT
Kombinasi 2	EXC 1	DT 1	MG 1	VR 2	WTT
Kombinasi 3	EXC 1	DT 2	MG 1	VR 1	WTT
Kombinasi 4	EXC 1	DT 2	MG 1	VR 2	WTT
Kombinasi 5	EXC 2	DT 1	MG 1	VR 1	WTT
Kombinasi 6	EXC 2	DT 1	MG 1	VR 2	WTT
Kombinasi 7	EXC 2	DT 2	MG 1	VR 1	WTT
Kombinasi 8	EXC 2	DT 2	MG 1	VR 2	WTT

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 9. Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Perkerasan Kaku

No	Alternatif Kombinasi	Kode Kombinasi		
1	Kombinasi 1	EXC 1	DT 1	SP 1
2	Kombinasi 2	EXC 1	DT 2	SP 1
3	Kombinasi 3	EXC 2	DT 1	SP 1
4	Kombinasi 4	EXC 2	DT 2	SP 1

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan Biaya Operasional Alat Berat

Setiap jenis alat berat memiliki biaya sewa serta biaya operasional yang timbul selama penggunaannya di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan biaya tersebut dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

Total Biaya Sewa Alat/Jam

= Biaya Pasti + Biaya Operasional

Hasil dari perhitungan biaya sewa dan operasional alat berat dapat dilihat di dalam **Tabel 10**

Tabel 10. Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Timbunan

No	Jenis Alat	Biaya Sewa & Operasional	Satuan
1	EXC 1	Rp 474,512.08	/jam
2	EXC 2	Rp 536,170.00	/jam
3	EXC 3	Rp 972,784.50	/jam
4	EXC 4	Rp 728,777.50	/jam
5	DT 1	Rp 843,107.55	/jam
6	DT 2	Rp 926,227.55	/jam
7	DT 3	Rp 919,883.80	/jam
8	MG	Rp 577,065.75	/jam
9	VR 1	Rp 469,749.00	/jam
10	VR 2	Rp 591,659.56	/jam
11	WTT	Rp 472,964.03	/jam
12	SP	Rp 590,427.84	/jam
13	BD 1	Rp 833,639.17	/jam
14	BD 2	Rp 767,332.92	/jam

Sumber: Hasil Perhitungan

Proses Optimasi Menggunakan Program Linear Metode Simpleks

Berdasarkan data yang telah diperoleh, meliputi volume pekerjaan, produktivitas alat berat, alternatif kombinasi, serta biaya sewa dan operasional, tahap selanjutnya Adalah melakukan proses optimasi. Proses ini diawali dengan pemaparan setiap kendala yang mempengaruhi perencanaan, kemudian dilanjutkan dengan penerapan metode optimasi menggunakan perangkat lunak LINDO (*Linear Interactive Discrete Optimizer*). Pada bagian ini disajikan salah satu contoh hasil perhitungan yang menunjukkan alternatif penggunaan alat berat dengan tingkat efisiensi optimal.

Optimasi Alternatif Kombinasi Alat Berat Pada Pekerjaan Galian

1. Penentuan Variable Keputusan
 X_1 = Jumlah unit excavator Komatsu PC300-8M2
 X_2 = Jumlah unit dump Truck Mitsubishi FM 65 FS Hi Gear
2. Penentuan Fungsi Tujuan

$$Z_{\min} = C1.X1 + C2.X2 + C3.X3$$

$Z_{\min}$ = Minimum Biaya penggunaan alat

$C1$ = Biaya excavator Komatsu PC300-8M2

$C2$ = dump Truck Mitsubishi FM 65 FS Hi Gear

$$Z_{\min} = 972784,50 X1 + 843107,55 X2$$

3. Penentuan Fungsi Kendala

a. Kendala Volume

$$\text{Volume perjam} = \frac{\text{Volume Total}}{\text{Durasi Pekerjaan}} \\ = 213,07 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Dengan produktifitas alat berat excavator Tipe Komatsu PC300-8M2 = 377,79 m³/jam

Dengan produktivitas alat berat Dump Truck Tipe Hino FM 65FS Hi Gear = 57,51 m³/jam, maka bentuk fungsi kendalanya adalah :

$$377,79X_1 \geq 213,07$$

$$57,51X_2 \geq 213,07$$

b. Kendala Area

Kendala jumlah alat berat dapat dilihat dari luas area yang memungkinkan alat berat tersebut beroperasi maksimal.

Lebar Area Proyek = 71,537 m

Sehingga, maksimal unit adalah

- Excavator (X_1)
Panjang = 11,3 meter
Lebar = 3,19 m = 6.38 m (Lebar setelah ditambah dengan gerak rotasi)
- Dump Truck (X_2)

$$\begin{aligned} \text{Panjang} &= 8,475 \text{ m} + 2 \text{ m (jarak)} \\ &= 10,475 \text{ m (Panjang Setelah ditambah jarak aman)} \\ \text{Lebar} &= 2,482 \text{ m} + 2 \text{ m (jarak)} \\ &= 4,482 \text{ m (Lebar Setelah ditambah jarak aman)} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan, didapat bahwa fungsi kendala luasnya adalah sebagai berikut :

$$6,38 X_1 \leq 71,537$$

$$4,482 X_2 \leq 71,537$$

c. Kendala Ketergantungan Alat

Produktivitas

Excavator Komatsu PC300-8M2 = 377,79 m³/jam

DT Mitsubishi FM 65 FS Hi Gear = 57,51 m³/jam

Sehingga,

Karena excavator akan dilayani oleh dump truck, sehingga rumus fungsi kendala ketergantungan alat excavator terhadap dump truck, adalah sebagai

$$\frac{X_1}{X_2} \leq \frac{377,79}{57,51}$$

Dari hasil perhitungan, didapat bahwa fungsi kendala ketergantungan alatnya adalah sebagai berikut :

$$57,51 X_1 - 377,79 X_2 = 0$$

d. Kendala Ketidaknegatifan

$$X_1 \geq 0$$

$$X_2 \geq 0$$

Berikut hasil optimasi penggunaan alat berat per jam dapat dilihat pada **Gambar 2**.

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X_1	0.563991	0.000000
X_2	3.704921	0.000000

Gambar 2. Hasil Optimasi Alternatif 1 Pekerjaan Galian Dengan Menggunakan Lindo 6.1

Sumber: Dokumen Pribadi

Didapatkan :

Excavator Komatsu PC300-8M2 : 0,56 : 1
unit Dump Truck Mitsubishi FM 62F HDR : 3,70 : 4
unit

$$Z_{\min} = \text{Rp } 972,784.50 X_1 + \text{Rp } 843,107.55 X_2$$

$$Z_{\min} = \text{Rp } 972,784.50 (1) + \text{Rp } 843,107.55 (4)$$

$$Z_{\min} = \text{Rp } 4,345,214.70 / \text{jam}$$

Tabel 11. Hasil Optimasi Biaya Alat Berat Pada Pekerjaan Galian

Alternatif	Kombinasi Alat Berat	Harga Unit/Jam (Rp)	Jmlh Unit/Jam	Total Harga/jam (Rp)
1	EXC 1	972,784.50	1	4,345,214.70
	DT 1	843,107.55	4	
2	EXC 1	972,784.50	1	3,751,467.15
	DT 2	926,227.55	3	
3	EXC 2	536,170.00	2	5,287,877.75
	DT 1	843,107.55	5	
4	EXC 2	536,170.00	2	4,777,250.20
	DT 2	926,227.55	4	

Sumber: Hasil Perhitungan

Penjadwalan Alat Berat

Penjadwalan proyek merupakan proses merencanakan urutan dan waktu pelaksanaan pekerjaan agar penyelesaian proyek dapat tercapai sesuai target yang telah ditentukan. Pada pekerjaan galian dan timbunan, penjadwalan dilakukan dengan mempertimbangkan penggunaan kombinasi alat berat dengan kapasitas berbeda. Perencanaan jadwal untuk pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku dibuat menggunakan metode *Precedence Diagram Method* (PDM) dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Project.

Berdasarkan hasil perhitungan Precedence Diagram Method (PDM) durasi pekerjaan pembersihan lahan adalah 15 hari, pekerjaan galian 111 hari, pekerjaan timbunan 172 hari, dan pekerjaan perkerasan kaku 128 hari.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis optimasi penggunaan alat berat pada pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan, dan perkerasan kaku Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA 9+000 hingga STA 14+000 yang dilakukan menggunakan metode *linear simplex*, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Volume pekerjaan galian struktur, pengecoran dan timbunan kembali pada pekerjaan *box culvert* sebagai berikut:
 - Volume pekerjaan pembersihan lahan sebesar 64.002,92 m³.
 - Volume pekerjaan galian pada kondisi asli sebesar 188.545,038 m³ dan kondisi lepas sebesar 263.963,05 m³.
 - Pekerjaan timbunan untuk badan jalan pada kondisi asli sebesar 1.1118.395,79 m³ dan pada kondisi lepas sebesar 1.565.754,11 m³.
 - Volume pekerjaan perkerasan kaku sebesar 35.100 m³.
2. Metode Pelaksanaan pekerjaan pembersihan lahan, galian, timbunan dan perkerasan kaku sebagai berikut :
 - a. Pekerjaan Pembersihan Lahan Kegiatan diawali dengan pengukuran dan pemasangan patok profil oleh surveyor untuk menentukan batas elevasi rencana. Selanjutnya dilakukan pengupasan vegetasi menggunakan bulldozer, diikuti pengangkutan material oleh excavator ke dump truck menuju lokasi pembuangan. Pembongkaran bangunan eksisting dilakukan dengan excavator, sedangkan pemotongan pohon dilakukan manual menggunakan gergaji mesin dan alat berat untuk mengangkat tunggul. Pada malam hari, area kerja diterangi dengan lampu dan lampu pada alat berat.
 - b. Pekerjaan Galian diawali dengan pengukuran dan pemasangan patok profil oleh surveyor untuk menentukan batas elevasi rencana. Setelah itu, excavator digunakan untuk menggali tanah sesuai batas yang telah ditentukan dan ketentuan teknis yang disepakati. Hasil galian dimuat ke dalam dump truck menggunakan excavator, kemudian tanah tersebut diangkut menuju lokasi pembuangan yang telah ditetapkan.
 - c. Pekerjaan Timbunan, Material timbunan diangkut oleh dump truck dari quarry menuju lokasi pekerjaan, kemudian disebar dan diratakan menggunakan motor grader. Setelah itu, lapisan timbunan akhir dipadatkan dan di-grading menggunakan vibratory roller sesuai gambar rencana, serta dilakukan penyiraman dengan water tank truck untuk mendukung proses pemadatan.
 - d. Pekerjaan Perkerasan Kaku dimulai dengan pembersihan permukaan lean concrete menggunakan air compressor dan cara manual, dilanjutkan pabrikasi pembesian di workshop serta pengukuran elevasi oleh surveyor. Setelah itu dilakukan pemasangan plastik cor, crack inducer, dan bekisting. Beton didatangkan dengan dump truck, dilakukan uji slump, lalu dicor setebal 30 cm dan diratakan dengan bantuan excavator. Permukaan beton kemudian dihaluskan dengan menggunakan slipform paver dan digrooving sebelum dilakukan water curing dua kali sehari selama 7 hari. Terakhir, dilakukan pemotongan sambungan beton kurang dari 10 jam setelah pengecoran untuk menghindari retak.
3. Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis, diketahui bahwa produktivitas alat berat yang digunakan pada masing-masing pekerjaan pada proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA 9+000 hingga STA 14+000 adalah :
 - a. Pada pekerjaan pembersihan lahan didapatkan produktivitas alat berat :
 - Excavator Komatsu PC3000-8M2 = 377,79 m³/jam
 - Excavator Komatsu PC 200 = 192,98 m³/jam
 - Dump Truck 1 (Untuk Exca 1) = 68,22 m³/jam
 - Dump Truck 1 (Untuk Exc 2) = 56,46 m³/jam
 - Dump Truck 2 (Untuk Exca 1) = 76,17 m³/jam
 - Dump Truck 2 (Untuk Exca 2) = 61,80 m³/jam
 - Bulldozer Komatsu D85E-SS = 147,235 m³/jam
 - Bulldozer Komatsu D65P-12 = 159,79 m³/jam
 - b. Pada pekerjaan Galian didapatkan produktivitas

alat berat :	Dump Truck Mitsubishi FN	Rp 926,227.55
- Excavator Komatsu PC3000-8M2	62F HD Lug	
= 377,79 m3/jam	Dump Truck Mitsubishi FN	Rp 919,883.80
- Excavator Komatsu PC 200	62F HDR	
= 185,26 m3/jam	Motor Grader Komatsu	Rp 577,065.75
- Dump Truck 1 (Untuk Exca 1)	GD535-5	
= 57,50 m3/jam	Vibratory Roller Ammann	Rp 591,659.56
- Dump Truck 1 (Untuk Exc 2)	ASC- 200	
= 48,30 m3/jam	Vibratory Roller Sakai	Rp 469,749.00
- Dump Truck 2 (Untuk Exca 1)	GD511A	
= 76,17 m3/jam	Water Tank Truck Mitsubishi	Rp 472,964.03
- Dump Truck 2 (Untuk Exca 2)	Slipform Paver Tipe Wirtgen	Rp 590,427.84
= 60,81 m3/jam	500	
c. Pada pekerjaan Timbunan didapatkan produktivitas alat berat :	Bulldozer Komatsu D85E-SS	Rp 833,639.17
- Excavator Komatsu PC3000-8M2	Buldozer Komatsu D65P-12	Rp 767,332.92
= 377,79 m3/jam		
- Excavator Komatsu PC 250LC-6		
= 304,78 m3/jam		
- Dump Truck 1 (Untuk Exca 1)		
= 68,22 m3/jam		
- Dump Truck 1 (Untuk Exc 2)		
= 64,84 m3/jam		
- Dump Truck 2 (Untuk Exca 1)		
= 76,17 m3/jam		
4. Dengan Alternatif Kombinasi (AK) alat berat yang digunakan adalah sebagai berikut		
a. Pekerjaan Pembersihan Lahan yaitu : AK 1 : EXC 1,DT1; AK2 : EXC2, DT2; AK3 : EXC2, DT1; AK4 : EXC2, DT2		
b. Pekerjaan Galian yaitu : AK 1 : EXC 1,DT1; AK2 : EXC2, DT2; AK3 : EXC2, DT1; AK4 : EXC2, DT2		
c. Pekerjaan Galian yaitu : AK 1 : EXC 1,DT1, MG1, VR1, WTT1; AK2 : EXC2, DT2, MG1, VR1, WTT1; AK3 : EXC2, DT1, MG1, VR2, WTT1; AK4 : EXC2, DT2, MG1, VR2, WTT1		
d. Pekerjaan Perkerasan yaitu : AK 1 : EXC 1,DT1, SF1; AK2 : EXC2, DT2, SF1; AK3 : EXC2, DT1, SF1; AK4 : EXC2, DT2, SF1		
5. Biaya operasional masing-masing alat berat yaitu :		
Excavator Komatsu PC7	Rp 474,512.08	
Excavator Komatsu PC200	Rp 536,170.00	
Excavator Komatsu PC300	Rp 972,784.50	
Excavator Komatsu PC250	Rp 728,777.50	
Dump Truck Mitsubishi FM	Rp 843,107.55	
65 FS Hi Gear		
6. Berdasarkan hasil optimasi dari beberapa alternatif kombinasi alat berat yang telah dianalisis, diperoleh bahwa penggunaan alat berat yang paling optimal adalah sebagai berikut:		
a. Pekerjaan Pembersihan Lahan menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 11,451,936.57, dengan kombinasi 1 Excavator tipe Komatsu Komatsu PC 300, 8 Dump Truck Mitsibishi FN 62F HD Lug, dan 4 Bulldozer D65P-12		
b. Pekerjaan Galian menggunakan alternatif kombinasi 2 dengan total biaya Rp 3,751,467.15, dengan kombinasi 1 Excavator Komatsu PC300-8M2, dan 3 Dump Truck Mitsibishi Fuso FN 62F HD Lug.		
c. Pekerjaan Timbunan menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 26,643,496.83, dengan kombinasi 3 Excavator Komatsu PC300-8M2, 11 Dump Truck Dump Truck Mitsubishi FN 62F HD Lug, 12 Motor Grader GD535-5, 3 Vibratorry Roller Tipe Sakai, dan 11 Water Tank Truck Tipe Fuso Canter FE(5000 L).		
d. Pekerjaan Perkerasan Kaku menggunakan alternatif kombinasi 4 dengan total biaya Rp 2,052,825.39, dengan kombinasi 1 Excavator tipe Komatsu PC 200, 1 Dump Truck Mitsubishi Fuso FN 62F HD Lug, dan 1 Slipform Paver Tipe Wirtgen 500.		
7. Berdasarkan hasil penjadwalan proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA 9+000 hingga STA 14+000, diperoleh estimasi durasi untuk masing-masing pekerjaan yaitu pembersihan lahan selama 15 hari kerja, pekerjaan galian selama 111 hari kerja, pekerjaan timbunan selama 172 hari kerja, dan pekerjaan perkerasan kaku membutuhkan waktu 128		

hari kerja.

8. Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan, diperoleh bahwa total biaya alat berat yang dibutuhkan untuk pelaksanaan pekerjaan pada proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi STA 9+000 hingga STA 14+000
 - Pada Pekerjaan Pembersihan Lahan dengan total biaya Rp 1,343,680,418.50
 - Pada Pekerjaan Galian dengan total biaya Rp 3,319,623,605.54
 - Pada Pekerjaan Timbunan dengan total biaya Rp 36,729,566,484.23
 - Pada Pekerjaan Perkerasan kaku dengan total biaya Rp 2,102,816,697.78

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sarmada, M. H., Setiono, J., & Purnomo, F. (2022). "Optimasi Alat Berat Pada Pekerjaan Galian Dan Timbunan Proyek Jls Paket 9 STA 0+000- 3+000,". Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK), 3(4), 200-207.
- [2] Rostiyanti (2008), "Alat-alat Berat Untuk Proyek Konstruksi Edisi Kedua", Rineka Cipta, Jakarta, 2008.
- [3] Kementerian PUPR (2023). " Peraturan Pemerintahan Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2023. Jakarta: Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum Kementerian PUPR
- [4] Siringorongo, H. (2005). "Seri Teknik Operasi. Pemrograman Linear," Graha Ilmu. Yogyakarta.
- [5] Nyoman Gunantara (2018), "Teknik Optimasi," UDAYANA UNIVERSITY PRESS.
- [6] Pradipta, Bagaskara Andri, Sitti Safiatus Riskijah, and Dyah Lidyaningtyas. "OPTIMASI ALAT BERAT PEKERJAAN MAINROAD DAN INTERCHANGE X TOL PANDAAN–MALANG," Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK) 1.2 (2020): 84-90.