

Optimasi Waktu dan Biaya (*Time Cost Trade Off – TCTO*) Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)

Mohammad Khabibulloh, dan Tri Joko Wahyu Adi
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: habib.b.jim1@gmail.com

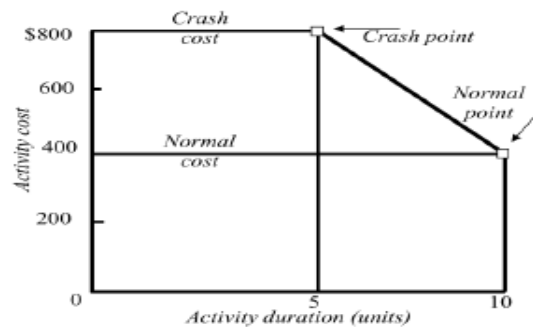
Abstrak—Pada Proyek Pembangunan Jalur Ganda Jalan Ka Lintas Selatan Jawa Km 49+500 Sd Km 52+500 Antara Mojokerto Solo (Paket JGMS-9) mengalami keterlambatan dikarenakan shopdrawing pengerjaan proyek belum disetujui. Akibat hal tersebut, perlu dilakukan optimasi percepatan waktu untuk mengejar keterlambatan dan mengestimasi pertambahan biayanya. Tugas akhir ini bertujuan untuk mereduksi keterlambatan penyelesaian proyek dengan mempercepat waktu penyelesaian proyek dan dengan biaya seminimal mungkin. Untuk mempercepat durasi proyek akan diterapkan metode Time Cost Trade Off (TCTO). Pada tugas akhir ini Data yang digunakan adalah data sekunder (Schedule, kurva S dan produktivitas pekerja) dan data primer. Optimasi metaheuristik, Particle Swarm Optimization (PSO), digunakan untuk mengoptimalkan pertukaran waktu dan biaya (Time Cost Trade off). algoritma dikerjakan menggunakan program bantu MatLab™. Tahapan penelitian dilakukan dengan menentukan objective function model PSO, men-generate particle dan menentukan velocity dari partikel. Simulasi dilakukan dengan melakukan 1000 kali iterasi. Untuk validasi model, dilakukan perhitungan TCTO secara matematis (manual) kemudian hasilnya dibandingkan dengan luaran PSO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, durasi normal pada pekerjaan jembatan adalah 302 hari dengan biaya normal sebesar Rp. 23.036.343.652. Durasi percepatan proyek setelah dilakukan analisa Time Cost Trade Off (TCTO) dengan menggunakan metode matematis adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.365.575.129. Durasi percepatan proyek setelah dilakukan analisa Time Cost Trade Off (TCTO) dengan menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.464.546.260. Dari hasil tersebut terlihat bahwa hasil analisis matematis dan analisis metaheuristik memberikan hasil yang sama, dengan perbedaan 0.001%. Oleh karena itu, model PSO ini dapat diterapkan untuk mengoptimasi waktu dan biaya proyek.

Kata Kunci—Optimasi, Percepatan, TCTO, PSO, Matlab, Algoritma.

I. PENDAHULUAN

PROSES perencanaan dalam pekerjaan konstruksi merupakan suatu hal yang penting sebelum dilakukannya pekerjaan proyek konstruksi. Tidak adanya perencanaan akan menyebabkan pekerjaan proyek konstruksi tidak bisa dikontrol maupun diprediksi untuk kedepannya. Hal ini terkait dalam segi waktu, biaya, material, serta tenaga kerja yang dibutuhkan dalam suatu pembangunan proyek.

Pada Pembangunan Jalur Ganda Jalan Ka Lintas Selatan Jawa Km 49+500 Sd Km 52+500 Antara Mojokerto – Solo (Paket JGMS-9), terdapat berbagai kontraktor yang dibagi menjadi sepuluh paket pekerjaan yang diharuskan pekerjaan diselesaikan secara bersamaan. Dalam proyek tersebut, proyek mengalami keterlambatan selama pekerjaannya yang membuat urutan pekerjaan keluar dari jadwal yang sudah direncanakan. Pada tanggal 4 Agustus 2021, *progress* yang



Gambar 1. Grafik *cost slope*.

telah direncanakan adalah sebesar 3,722% sedangkan *progress* yang sudah dicapai sebesar 1,513%. Dalam masalah terkait ini, proyek mengalami keterlambatan. Maka dari itu demi menyelesaikan proyek sesuai dengan jadwal yang telah direncanakan, maka dilakukan percepatan agar dapat mereduksi keterlambatan yang telah terjadi sehingga proyek bisa selesai tepat waktu.

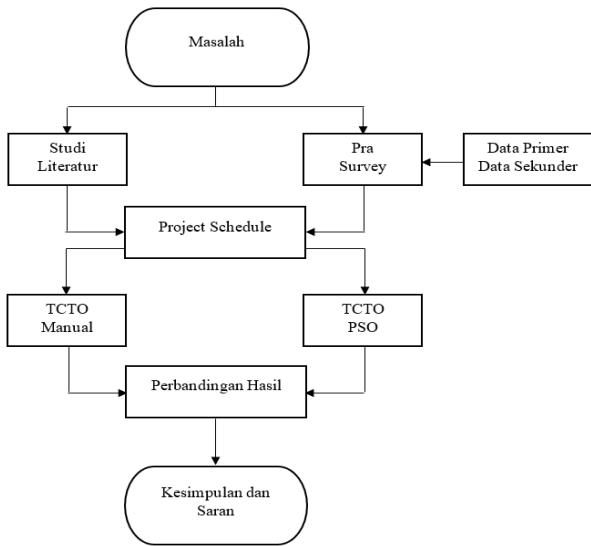
Keterlambatan proyek dapat diatasi dengan cara melakukan percepatan pada durasi proyek. Percepatan dilakukan dengan penambahan biaya pada beberapa aktivitas pekerjaan. Metode yang biasa digunakan untuk mempercepat aktivitas pekerjaan adalah *Time Cost trade Off*. Metode ini bertujuan untuk mempercepat durasi penyelesaian proyek dengan penambahan biaya yang minimum terhadap aktivitas pekerjaan yang dapat dipercepat. Dengan penyelesaian percepatan yang paling maksimum dengan biaya paling minimum. Metode ini dapat dilakukan dengan menambah jam kerja, tenaga kerja, dan alat bantu agar proyek lebih produktif pada penyelesaiannya.

Berkembangnya teknologi dan konstruksi 4.0 menyebabkan permasalahan konstruksi bisa diselesaikan dengan cepat menggunakan *Artificial Intelligence* (AI). *Metaheuristic* merupakan salah satu metode optimasi *global search* yang banyak digunakan untuk menyelesaikan kasus kasus yang memiliki kompleksitas tinggi. Beberapa metode seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), dan lainnya merupakan metode yang saat ini banyak digunakan dan diimplementasikan di industri konstruksi.

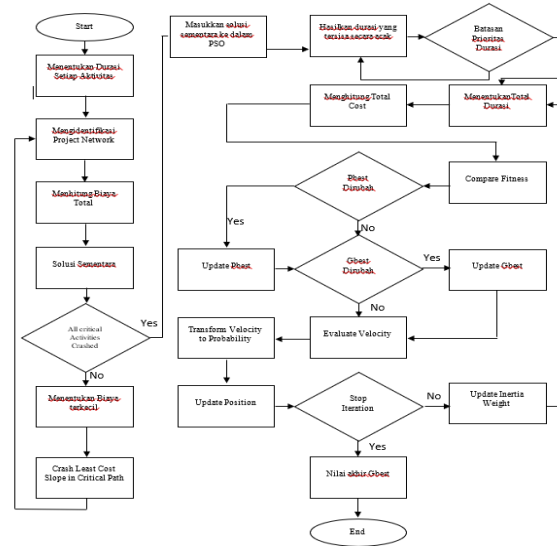
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Proyek

Proyek konstruksi dapat digambarkan sebagai upaya kreatif untuk menyatukan bahan konstruksi, tenaga kerja, dan fasilitas yang dibangun uang. Proyek konstruksi diproses dengan beberapa *fabrikasi* dan pembangunan di lapangan dari



Gambar 2. Bagan alir metodologi penelitian.



Gambar 1. Flowchart PSO.

fasilitas yang dirancang khusus yang ditentukan oleh *owner* [1].

Dalam melaksanakan suatu proyek dimasukkan sebuah kegiatan dan sumber daya yang menjadikan *output* dalam melaksanakan sebuah proyek konstruksi. Dalam pelaksanaan proyek terjadi keterlambatan dalam pelaksanaan maupun pembiayaan melampaui batas anggaran yang telah direncanakan. Sehingga tim proyek membutuhkan perencanaan yang terperinci sehingga seluruh kegiatan dalam proyek bisa dijadwalkan dan dikontrol dengan baik dalam pelaksanaan pekerjaan maupun anggaran biayanya [2].

B. Penjadwalan

Penjadwalan dalam sebuah proyek ditetapkan ketika berbagai tonggak pencapaian proyek diidentifikasi, terletak dalam waktu kalender atau dalam hitungan minggu proyek dari beberapa datum, dan diikat ke dalam jangka waktu kontrak tertentu. Upaya penjadwalan ini diperlukan oleh kondisi kontrak atau tidak sebagian besar kontraktor (terutama pada proyek industri, listrik, dan teknik berat yang terbantu untuk menentukan persyaratan rencana konstruksi mereka dari model jaringan dan untuk menetapkan jadwal konstruksi mereka dengan analisis jaringan [1].

Mengatur jadwal proyek merupakan berpikir secara mendalam melalui berbagai persoalan-persoalan. Menguji jalur-jalur yang logis serta menyusun berbagai macam tugas yang menghasilkan suatu kegiatan lengkap dan menuliskan bermacam-macam kegiatan dalam kerangka yang logis dan rangkaian waktu yang tepat [3].

1) Kurva S

Kurva S adalah sebuah grafik yang dikembangkan atas dasar pengamatan terhadap sejumlah besar proyek sejak awal hingga akhir proyek. Kurva S tersebut dapat dipergunakan sebagai pembanding saja karena tidak secara rinci memberikan data yang diberikan. Kurva S ini sendiri sering digunakan pada pekerjaan yang tidak terlalu banyak kegiatan [3].

Penggambaran kurva S merupakan visualisasi dari kemajuan pekerjaan kumulatif pada sumbu vertikal terhadap waktu pada sumbu horizontal. Kemajuan pekerjaan dalam kurva S didefinisikan sebagai prosentase bobot dari setiap

kegiatan. Nilai dari bobot setiap pekerjaan dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$Bobot (\%) = \frac{Biaya\ Pekerjaan}{Total\ Biaya\ Proyek} \times 100\% \quad (1)$$

2) Network Planning

Network Planning didefinisikan sebagai suatu teknik yang banyak digunakan dalam penyelenggaraan proyek untuk merencanakan, menjadwalkan serta mengawasi aktivitas pekerjaan di dalam proyek. *Network Planning* dilakukan menggunakan pendekatan dari analisis waktu dan biaya yang biasa digambarkan dalam bentuk diagram pekerjaan [4].

3) Critical Path Method

CPM atau Metode Jalur Kritis adalah suatu jalur kegiatan dari setiap komponen-komponen kegiatan, dengan menunjukkan kurun waktu penyelesaian proyek tercepat dan saling berhubungan antar setiap komponen [4]. Hal lain yang perlu diperhatikan berkaitan dengan jalur kritis yaitu slack pekerjaan jalur kritis sama dengan nol, sehingga memungkinkan relokasi sumber daya dari pekerjaan non kritis ke pekerjaan kritis. CPM dibangun atas suatu *network* yang dihitung dengan cara tertentu dan dapat pula dengan *software*. Metode ini sangat bermanfaat dalam perencanaan dan pelaksanaan pengawasan pembangunan suatu proyek. Penggunaan CPM secara sederhana bermaksud untuk membuat jadwal yang berukuran besar pada proyek besar menjadi jadwal yang lebih kecil sehingga jadwal tersebut dapat lebih mudah untuk dikelola.

Metode ini merupakan model kegiatan proyek yang digambarkan dalam bentuk jaringan. Pengerjaannya menggunakan asumsi, bahwa kegiatan dapat dimulai setelah kegiatan sebelumnya (*predecessor*) sudah selesai. Untuk mengetahui data kegiatan *predecessor*, dilakukan pada saat inventarisasi kegiatan yang mengacu pada kurva S proyek yang sudah ada. Seperti yang tertulis pada sub bab *network planning*, jaringan CPM disusun dengan menggambarkan anak panah sebagai hubungan antar kegiatan dan lingkaran sebagai kegiatan.

4) Crashing

Crashing adalah kegiatan yang dilakukan dalam proyek untuk mempersingkat durasi pekerjaannya. *Crashing* dapat

Tabel 1.
Lintasan kritis pada Proyek

| Lintasan Kritis | Kode Pekerjaan | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B | C | G | F | P | S | T | U | V | W | X | Z |
| Lintasan 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lintasan 2 | 2 | 2 | | | 2 | 2 | | | | | | 2 |
| Lintasan 3 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | | 3 |

Tabel 2.
Hasil Perhitungan Durasi Normal

| No. | Uraian Pekerjaan Jembatan | sat | Volume | Koef. | Produktivitas/hari | Durasi Normal (hari) |
|-----|--|------|-----------|-------|--------------------|----------------------|
| 1 | Membuat Manhole dari beton uk. 100x150x130 cm | unit | 60,00 | 2,580 | 0,7752 | 76,400 |
| 2 | Bore Pile dia. 80 cm, K 350 | m' | 510,00 | 0,096 | 10,4167 | 62,960 |
| 3 | Memotong/bobok borepile dia. 80 cm | bh | 30,00 | 4,000 | 1,0000 | 28,000 |
| 4 | Memancang SSP untuk Shoring penahan tanah | m' | 5760,00 | 0,500 | 120,0000 | 42,000 |
| 5 | Mencabut SSP untuk shoring | m' | 5760,00 | 0,500 | 120,0000 | 42,000 |
| 6 | Pemasangan H-Beam untuk bracing keliling shoring | m' | 3200,00 | 1,000 | 110,0000 | 41,091 |
| 7 | Pengadaan Mini Pile Square 25 x 25 | m' | 6237,00 | 0,043 | 138,1245 | 41,155 |
| 8 | Pemancangan Mini Pile Square 25 x 25 | m' | 5197,50 | 0,750 | 64,0000 | 83,211 |
| 9 | Kupas Kepala Mini Pile | bh | 2079,00 | 1,000 | 30,0000 | 76,300 |
| 10 | Urugan Pasir | m3 | 117,58 | 0,300 | 3,3333 | 118,274 |
| 11 | Lantai Kerja Beton K-175 | m3 | 126,86 | 1,650 | 3,0303 | 118,864 |
| 12 | Bekisting Pondasi | m2 | 787,04 | 0,660 | 7,5758 | 118,889 |
| 13 | Bekisting Dinding, Wingwall dan Parapet | m2 | 4697,04 | 0,660 | 106,0606 | 41,286 |
| 14 | Bekisting lantai | m2 | 110,30 | 0,660 | 1,5152 | 83,798 |
| 15 | Bekisting Balok | m2 | 64,80 | 0,033 | 30,3030 | 83,138 |
| 16 | Pembesian U-32 | kg | 305756,26 | 0,007 | 2428,5714 | 125,900 |
| 17 | Pembesian BJTD 40 | kg | 45783,02 | 0,007 | 428,5714 | 125,827 |
| 18 | Beton K - 300 | m3 | 2192,10 | 1,650 | 19,3939 | 111,030 |
| 19 | Beton K - 350 | m3 | 7,49 | 1,650 | 3,0303 | 6,472 |
| 20 | Drainase suling-suling Pipa Galvanis 2" | m' | 1096,00 | 0,060 | 33,3333 | 41,880 |
| 21 | Pekerjaan Bangunan Atas Jembatan | | | | | |
| | - Pengadaan/pembuatan beton Voided Slab L 11,4 m | bh | 15,00 | 2,571 | 0,3889 | 41,571 |
| | - Elastomer bearing pad | bh | 30,00 | 0,750 | 2,3334 | 13,857 |
| | - Erection Vioded Slab Bentang 11,4 m | bh | 15,00 | 2,571 | 1,1667 | 13,857 |
| | - Pin Bearing fix dan move | bh | 30,00 | 0,750 | 4,0000 | 6,500 |
| | - Pemasangan andas dengan grouting | m3 | 1,50 | 7,500 | 0,2667 | 6,625 |
| | - Railling Jembatan T= 1 m | m' | 72,00 | 2,571 | 2,7223 | 27,449 |
| | - Expantion Joint | m' | 26,25 | 0,750 | 4,0000 | 6,563 |

Tabel 3.
Hasil Perhitungan Harga Normal

| No | Uraian Pekerjaan | sat | Volume | Harga Satuan Pekerjaan | Jumlah Harga Normal |
|----|--|------|-----------|------------------------|---------------------|
| 1 | Membuat Manhole dari beton uk. 100x150x130 cm | unit | 60,00 | Rp6.010.880 | Rp360.652.800 |
| 2 | Bore Pile dia. 80 cm, K 350 | m' | 510,00 | Rp1.506.700 | Rp768.417.000 |
| 3 | Memotong/bobok borepile dia. 80 cm | bh | 30,00 | Rp491.900 | Rp14.757.000 |
| 4 | Memancang SSP untuk Shoring penahan tanah | m' | 5760,00 | Rp317.500 | Rp1.828.800.000 |
| 5 | Mencabut SSP untuk shoring | m' | 5760,00 | Rp317.500 | Rp1.828.800.000 |
| 6 | Pemasangan H-Beam untuk bracing keliling shoring | m' | 3200,00 | Rp396.960 | Rp1.270.272.000 |
| 7 | Pengadaan Mini Pile Square 25 x 25 | m' | 6237,00 | Rp215.050 | Rp1.341.266.850 |
| 8 | Pemancangan Mini Pile Square 25 x 25 | m' | 5197,50 | Rp312.500 | Rp1.624.218.750 |
| 9 | Kupas Kepala Mini Pile | bh | 2079,00 | Rp128.900 | Rp267.983.100 |
| 10 | Urugan Pasir | m3 | 117,58 | Rp156.680 | Rp18.422.434 |
| 11 | Lantai Kerja Beton K-175 | m3 | 126,86 | Rp1.113.810 | Rp141.297.937 |
| 12 | Bekisting Pondasi | m2 | 787,04 | Rp402.070 | Rp316.445.173 |
| 13 | Bekisting Dinding, Wingwall dan Parapet | m2 | 4697,04 | Rp477.070 | Rp2.240.816.873 |
| 14 | Bekisting lantai | m2 | 110,30 | Rp402.070 | Rp44.348.321 |
| 15 | Bekisting Balok | m2 | 64,80 | Rp402.070 | Rp26.054.136 |
| 16 | Pembesian U-32 | kg | 305756,26 | Rp15.290 | Rp4.675.013.215 |
| 17 | Pembesian BJTD 40 | kg | 45783,02 | Rp15.290 | Rp700.022.376 |
| 18 | Beton K - 300 | m3 | 2192,10 | Rp1.437.060 | Rp3.150.179.226 |
| 19 | Beton K - 350 | m3 | 7,49 | Rp1.448.310 | Rp10.847.842 |
| 20 | Drainase suling-suling Pipa Galvanis 2" | m' | 1096,00 | Rp430.220 | Rp471.521.120 |
| 21 | Pekerjaan Bangunan Atas Jembatan | | | | |
| | - Pengadaan/pembuatan beton Voided Slab L 11,4 m | bh | 15,00 | Rp110.000.000 | Rp1.650.000.000 |
| | - Elastomer bearing pad | bh | 30,00 | Rp2.530.000 | Rp75.900.000 |
| | - Erection Vioded Slab Bentang 11,4 m | bh | 15,00 | Rp3.709.200 | Rp55.638.000 |
| | - Pin Bearing fix dan move | bh | 30,00 | Rp750.000 | Rp22.500.000 |
| | - Pemasangan andas dengan grouting | m3 | 1,50 | Rp9.583.000 | Rp14.374.500 |
| | - Railling Jembatan T= 1 m | m' | 72,00 | Rp360.000 | Rp25.920.000 |
| | - Expantion Joint | m' | 26,25 | Rp3.500.000 | Rp91.875.000 |

dilakukan jika diketahui terlebih dahulu lintasan kritisnya. Lintasan kritis dapat membantu dalam penentuan kegiatan mana yang akan dilakukan *crashing* durasinya. Terdapat

beberapa hal dalam melakukan *crashing* dalam suatu proyek, salah satunya yaitu proyek mengalami keterlambatan sehingga perlu adanya percepatan pada pengerjaannya guna

Tabel 4.
Hasil Perhitungan *Crash Duration*, *Crash Cost*, dan *Cost Slope*

| No | Uraian | Normal Cost | Crash Cost | Cost Slope |
|---------------------------|--|-----------------|---------------------|---------------------|
| Pekerjaan Jembatan | | | | |
| 1 | Membuat Manhole dari beton uk. 100x150x130 cm | Rp360.653.340 | Rp354.759.243 | -Rp135.183 |
| 2 | Bore Pile dia. 80 cm, K 350 | Rp768.417.000 | Rp1.150.906.489 | Rp170.568.230 |
| 3 | Memotong/bobok borepile dia. 80 cm | Rp14.757.000 | Rp20.238.171 | Rp274.059 |
| 4 | Memancang SSP untuk Shoring penahan tanah | Rp1.828.800.000 | Rp67.890.728.571 | Rp6.881.450.893 |
| 5 | Mencabut SSP untuk shoring | Rp1.828.800.000 | Rp67.890.728.571 | Rp6.881.450.893 |
| 6 | Pemasangan H-Beam untuk bracing keliling shoring | Rp1.270.284.157 | Rp92.949.612.405 | Rp9.454.430.726 |
| 7 | Pengadaan Mini Pile Square 25 x 25 | Rp1.341.269.380 | Rp10.770.008.248 | Rp9.822.678.292 |
| 8 | Pemancangan Mini Pile Square 25 x 25 | Rp1.624.218.750 | Rp62.021.217.001 | Rp2.726.919.145 |
| 9 | Kupas Kepala Mini Pile | Rp267.983.100 | Rp13.453.243.332 | Rp570.790.486 |
| 10 | Urugan Pasir | Rp18.422.434 | Rp78.021.473 | Rp12.953.619 |
| 11 | Lantai Kerja Beton K-175 | Rp141.298.472 | Rp706.357.962 | Rp29.858.257 |
| 12 | Bekisting Pondasi | Rp316.445.960 | Rp1.481.027.444 | Rp45.179.024 |
| 13 | Bekisting Dinding, Wingwall dan Parapet | Rp2.240.821.570 | Rp96.940.116.702 | Rp8.618.154.854 |
| 14 | Bekisting lantai | Rp44.348.431 | Rp71.232.113 | Rp1.488.357 |
| 15 | Bekisting Balok | Rp26.054.201 | Rp1.106.820.172 | Rp31.136.239.196 |
| 16 | Pembesian U-32 | Rp4.675.624.728 | Rp2.124.261.381.308 | Rp4.826.983.883.707 |
| 17 | Pembesian BJTD 40 | Rp700.113.942 | Rp56.781.116.382 | Rp150.516.419.375 |
| 18 | Beton K - 300 | Rp3.150.181.418 | Rp18.106.744.450 | Rp292.715.957 |
| 19 | Beton K - 350 | Rp10.847.849 | Rp48.739.167 | Rp33.911.959 |
| 20 | Drainase suling-suling Pipa Galvanis 2" | Rp471.523.312 | Rp1.240.273.519 | Rp802.729.839 |
| 21 | Pekerjaan Bangunan Atas Jembatan | | | |
| | - Pengadaan/pembuatan beton Voided Slab L 11,4 m | Rp1.650.000.000 | Rp1.940.408.626 | Rp13.385.303 |
| | - Elastomer bearing pad | Rp75.900.000 | Rp94.019.978 | Rp5.167.607 |
| | - Erection Voided Slab Bentang 11,4 m | Rp55.638.000 | Rp70.596.649 | Rp2.068.389 |
| | - Pin Bearing fix dan move | Rp22.500.000 | Rp37.497.408 | Rp7.332.066 |
| | - Pemasangan andas dengan grouting | Rp14.374.500 | Rp26.297.272 | Rp2.684.832 |
| | - Railling Jembatan T= 1 m | Rp25.920.000 | Rp32.058.859 | Rp412.632 |
| | - Expantion Joint | Rp91.875.000 | Rp109.203.654 | Rp9.682.042 |

Tabel 5.
Total Durasi Proyek setelah Dilakukan Percepatan

| Iterasi | Durasi | Cost Slope | Biaya Langsung | Biaya Tidak Langsung | Total Biaya |
|---------|--------|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 0 | 302 | - | Rp23.036.343.653 | Rp5.551.145.346 | Rp28.587.488.999 |
| 1 | 287 | Rp412.632 | Rp23.042.533.137 | Rp5.423.041.992 | Rp28.465.575.129 |
| 2 | 267 | Rp274.059 | Rp23.048.014.308 | Rp5.252.237.520 | Rp28.300.251.828 |
| 3 | 267 | Rp9.454.430.726 | Rp117.592.321.564 | Rp5.252.237.520 | Rp122.844.559.084 |
| 4 | 266 | Rp33.911.959 | Rp117.626.233.523 | Rp5.243.697.296 | Rp122.869.930.819 |

mencapai target awal penyelesaian proyek dan menghindari hal yang tidak diinginkan ketika proyek terlambat [5].

Pada penelitian ini akan dilakukan crashing menggunakan penambahan alternatif *shift* kerja. Pada saat pemakaian *shift* kerja harapannya bisa meningkatkan produktivitas tenaga kerja pada proyek, sebab pekerja pada masing-masing shift orangnya tidak sama. Pembagian pekerja berdasarkan data tenaga kerja pada proyek yang dilakukan penelitian. Jumlah *shift* disesuaikan dengan kebutuhan proyek.

C. Rencana Anggaran Biaya

Rencana anggaran biaya suatu bangunan atau proyek adalah suatu nilai estimasi biaya yang harus disediakan untuk pelaksanaan sebuah kegiatan yang dikerjakan dalam suatu proyek. Dengan adanya RAB dapat dijadikan acuan pelaksanaan pekerjaan yang memuat estimasi biaya dari proyek [4].

RAB terdiri dari biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*). Berbeda dengan biaya langsung, biaya tidak langsung bisa dikategorikan dalam biaya yang tidak berhubungan langsung dengan pekerjaan konstruksi seperti, konsultan, administrasi, dll. biaya tidak langsung tidak bisa dikelompokkan seperti biaya langsung yang menjadi kepastian dalam upah pekerja, material, peralatan. Biaya langsung sendiri juga tidak memiliki kepastian dalam penentuan harga dari setiap masing-masing item biaya, hal ini dipengaruhi oleh pekerjaan apa yang

dilakukan dan juga lokasi dari pekerjaan itu dilakukan.

D. Cost Slope

Cost slope adalah penambahan biaya langsung untuk mempercepat durasi suatu aktivitas per satuan waktu [5]. Pertambahan waktu berbanding lurus dengan nilai *crash cost*. *Cost slope* didasarkan pada pemilihan kegiatan kritis tergantung pada pengidentifikasian kegiatan-kegiatan dengan waktu normal yang berhubungan dengan kegiatan lainnya. *Cost slope* digunakan untuk penyelesaian kegiatan tercepat yang mungkin dapat dicapai dengan batas biaya yang ditentukan. Pada Gambar 1 dapat dilihat pada titik pacu (*crash point*) menunjukkan waktu maksimum dari sebuah kegiatan yang dapat dipercepat, dan juga dapat dilihat kurun pengurangan waktu yang dibutuhkan dengan biaya yang berbeda pada garis miring (*slope*).

Berdasarkan kemiringan yang terjadi dari masing-masing perubahan titik. Dapat diperoleh kesimpulan identifikasi mengenai pengaruh biaya terhadap waktu, maka dengan kesimpulan tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$Cost\ Slope = \frac{Crash\ cost - Normal\ cost}{Normal\ time - Crash\ time} \quad (2)$$

E. Jenis Biaya pada Proyek

Biaya dalam proyek konstruksi dibagi menjadi dua, yaitu biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*). Biaya tidak langsung antara lain adalah gaji

Tabel 6.
Hasil Perhitungan Crash Cost, Crash Duration, dan Cost Slope Menggunakan Algoritma PSO

| No. | Pekerjaan Jembatan | Crash Cost | Crash Duration | Cost Slope |
|-----|--|---------------------|----------------|---------------------|
| 1 | Membuat Manhole dari beton uk. 100x150x130 cm | Rp384.047.860 | 32,80 | Rp536.561 |
| 2 | Bore Pile dia. 80 cm, K 350 | Rp933.360.300 | 60,72 | Rp73.555.189 |
| 3 | Memotong/bobok borepile dia. 80 cm | Rp34.995.168 | 8,00 | Rp1.011.908 |
| 4 | Memancang SSP untuk Shoring penahan tanah | Rp68.480.229.960 | 32,40 | Rp6.942.857.288 |
| 5 | Mencabut SSP untuk shoring | Rp68.480.229.960 | 32,40 | Rp6.942.857.288 |
| 6 | Pemasangan H-Beam untuk bracing keliling shoring | Rp92.899.175.426 | 31,39 | Rp9.449.229.412 |
| 7 | Pengadaan Mini Pile Square 25 x 25 | Rp10.930.948.991 | 40,20 | Rp9.990.343.253 |
| 8 | Pemancangan Mini Pile Square 25 x 25 | Rp62.576.108.672 | 61,06 | Rp2.751.972.455 |
| 9 | Kupas Kepala Mini Pile | Rp13.721.226.498 | 53,20 | Rp582.391.489 |
| 10 | Urugan Pasir | Rp44.677.032 | 113,67 | Rp5.706.335 |
| 11 | Lantai Kerja Beton K-175 | Rp360.317.425 | 99,94 | Rp11.573.160 |
| 12 | Bekisting Pondasi | Rp1.535.334.677 | 93,11 | Rp47.285.831 |
| 13 | Bekisting Dinding, Wingwall dan Parapet | Rp97.666.152.664 | 30,30 | Rp8.684.228.106 |
| 14 | Bekisting lantai | Rp78.567.995 | 65,74 | Rp1.894.492 |
| 15 | Bekisting Balok | Rp417.630.105 | 83,10 | Rp11.281.074.114 |
| 16 | Pembesian U-32 | Rp2.124.806.543.382 | 125,46 | Rp4.828.225.394.477 |
| 17 | Pembesian BJTD 40 | Rp56.756.940.656 | 125,45 | Rp150.451.533.879 |
| 18 | Beton K - 300 | Rp18.700.735.652 | 59,93 | Rp304.341.001 |
| 19 | Beton K - 350 | Rp23.572.483 | 5,35 | Rp11.388.288 |
| 20 | Drainase suling-suling Pipa Galvanis 2" | Rp1.107.435.679 | 40,92 | Rp664.020.416 |
| 21 | Pekerjaan Bangunan Atas Jembatan | | | |
| | - Pengadaan/pembuatan beton Voided Slab L 11,4 m | Rp1.653.996.764 | 19,87 | Rp184.216 |
| | - Elastomer bearing pad | Rp89.962.523 | 10,35 | Rp4.010.468 |
| | - Erection Vioded Slab Bentang 11,4 m | Rp67.628.301 | 6,62 | Rp1.657.945 |
| | - Pin Bearing fix dan move | Rp44.617.247 | 4,45 | Rp10.812.876 |
| | - Pemasangan andas dengan grouting | Rp16.872.107 | 2,18 | Rp562.424 |
| | - Railling Jembatan T= 1 m | Rp31.038.406 | 12,57 | Rp344.041 |
| | - Expantion Joint | Rp112.412.541 | 4,77 | Rp11.474.944 |

Tabel 7.
Durasi Percepatan Menggunakan Algoritma PSO

| Iterasi | Durasi | Cost Slope | Biaya Langsung | Biaya Tidak Langsung | Total Biaya |
|---------|--------|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 0 | 302 | - | Rp23.036.343.653 | Rp5.551.145.346 | Rp28.587.488.999 |
| 1 | 287 | Rp344.041 | Rp23.041.504.268 | Rp5.423.041.992 | Rp28.464.546.260 |
| 2 | 267 | Rp1.011.908 | Rp23.061.742.436 | Rp5.252.237.520 | Rp28.313.979.956 |
| 3 | 267 | Rp9.449.229.412 | Rp117.554.036.557 | Rp5.252.237.520 | Rp122.806.274.077 |
| 4 | 266 | Rp11.388.288 | Rp117.565.424.845 | Rp5.243.697.296 | Rp122.809.122.142 |

dan pengeluaran dana bagi tim penyedia dan penyelenggara proyek, pengadaan fasilitas sementara dalam rentang waktu pengerjaan proyek, menyewa atau membeli peralatan konstruksi, dan juga bunga atau pajak dari dana yang diperlukan proyek [6]m.

Dalam perhitungan *cash flow actual cost* pelaksanaan proyek dibagi menjadi dua yaitu, biaya tidak langsung/*overhead* proyek yang bisa diasumsikan sebesar 5% dari RAB dan biaya langsung merupakan biaya pelaksanaan konstruksi fisik yang nilainya adalah selisih antara biaya tidak langsung dan RAP (Rencana Anggaran Pelaksanaan). Nilai dari RAP adalah 90% dari nilai RAB, sedangkan 10% dari nilai RAB adalah keuntungan umum kontraktor, Untuk nilai dari biaya langsung bisa dipastikan sebesar 85% dari nilai RAB [7].

F. Time Cost Trade Off

Dalam percepatan durasi waktu pada sebuah proyek, tentu memiliki alasan tersendiri sebelum dilakukannya percepatan. Pertanyaan utama yang dapat dimunculkan dalam percepatan adalah kegiatan apa yang harus dipercepat untuk mencapai hasil yang diinginkan dengan biaya tambahan yang minimal.

Peneliti mencoba dalam mengidentifikasi kegiatan yang akan ditopang dan biaya proyek minimum untuk setiap durasi proyek yang layak dengan parameterisasi durasi proyek.

Dalam proses penyelesaian proyek, perlu dilakukan penekanan waktu untuk setiap kegiatan dengan penambahan biaya seminimal mungkin. Penekanan dari setiap kegiatan juga harus dilihat dari lintasan kritisnya, sehingga apabila tidak maka waktu penyelesaian proyek tidak akan berkurang.

G. Particle Swarm Optimization

Pada awal 1990-an, beberapa penelitian tentang perilaku sosial kelompok hewan dikembangkan. Studi-studi ini menunjukkan bahwa beberapa hewan yang termasuk dalam kelompok tertentu, yaitu burung dan ikan, dapat berbagi informasi di antara kelompoknya, dan kemampuan tersebut memberi hewan-hewan ini keuntungan bertahan hidup yang besar. Terinspirasi oleh karya-karya ini, Kennedy dan Eberhart mengusulkan pada tahun 1995 algoritma PSO, sebuah algoritma metaheuristik yang sesuai untuk mengoptimalkan fungsi kontinu *non linier*. Penulis memperoleh algoritma yang terinspirasi oleh konsep kecerdasan kawanan, yang sering terlihat pada kelompok hewan, seperti kawanan dan kawanan.

PSO digunakan untuk menemukan titik terbaik masalah yang memiliki masalah optimasi. Kawanan harus mengidentifikasi titik terbaik, misalnya, garis lintang dan garis bujur, untuk memaksimalkan kondisi kelangsungan hidup anggotanya. Untuk melakukannya, setiap burung terbang mencari dan menilai titik-titik yang berbeda menggunakan beberapa kriteria bertahan hidup pada saat

yang sama. Masing-masing memiliki keunggulan untuk mengetahui di mana titik lokasi terbaik ditemukan hingga diketahui oleh seluruh *swarm*.

Kennedy dan Eberhart terinspirasi oleh perilaku sosial burung, yang memberi mereka keuntungan besar untuk bertahan hidup ketika memecahkan masalah menemukan titik aman ke daratan, mengusulkan sebuah algoritma yang disebut PSO yang bisa meniru perilaku ini. Versi inersia, juga dikenal sebagai versi klasik, dari algoritma diusulkan pada tahun 1995. Sejak itu, versi lain telah diusulkan sebagai variasi dari formulasi klasik, yaitu, penurunan berat inersia linier, berat faktor penyempitan kelembaman dinamis dan pengurangan kecepatan maksimum, juga dalam Ref., selain model *hybrid* atau bahkan teknik optimasi pendekatan yang terinspirasi kuantum yang dapat diterapkan pada PSO. Bab ini hanya akan menyajikan model inersia PSO, karena ini adalah algoritma mutakhir, dan untuk lebih memahami turunan dari PSO, pertama-tama kita harus memahami versi klasiknya.

Proses evolusi diinisialisasi dengan sekelompok partikel acak (solusi). Partikel ke- i diwakili oleh posisinya sebagai titik dalam ruang s -dimensi, di mana s adalah jumlah variabel. Sepanjang proses, setiap partikel i yang memonitor tiga nilai: posisinya saat ini ($X_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is}$); posisi terbaik yang dicapai pada siklus sebelumnya ($P_i = p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is}$); dan kecepatan terbangnya ($V_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is}$). Dalam setiap siklus, ditentukan posisi partikel terbaik (P_g). Berikut ini merupakan model matematika yang menggambarkan mekanisme *updating status* partikel Kennedy and Eberhart (1995). Persamaan 1, update kecepatan partikel

$$\text{New } V_i = \omega \cdot V_i + c_1 r_1 (P_i - X_i) + c_2 r_2 (P_g - X_i) \quad (3)$$

Persamaan 2, update posisi partikel

$$\begin{aligned} \text{New position } X_i &= \text{new } V_i + \text{current position } X_i; \\ V_{\max} &\geq V_i \geq -V_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

Dimana:

P_i = Posisi partikel ke- i

P_g = Posisi terbaik secara global

c_1, c_2 = Learning factor (0, 4)

r_1, r_2 = Bilangan random (0 - 1)

V_{\max} adalah batas atas perubahan maksimum kecepatan partikel. Operator ω (berkurang secara linear terhadap waktu dari nilai 1,4 sampai 0,5) adalah bobot inersia yang digunakan sebagai perbaikan yang diusulkan oleh peneliti untuk mengontrol dampak dari sejarah kecepatan sebelumnya pada kecepatan saat ini dan memainkan peran menyeimbangkan pencarian global dan lokal. Sedangkan untuk bilangan random sendiri adalah urutan hasil pola yang biasa digunakan dalam iterasi jumlah banyak tentunya berisi beberapa pola yang dapat dideteksi di belakang dan dapat dilihat dari beberapa kemungkinan. Dalam TCTO, bilangan random diambil pola dari durasi aktivitas yang memungkinkan dapat dipercepat dari durasi semula.

H. Penerapan PSO ke dalam TCTO

Dalam penerapan TCTO ke dalam PSO telah dikodekan ke dalam bahasa pemrograman dan semua eksperimen dilakukan pada mesin computer. Bagian depan *pareto* yang dihasilkan oleh algoritma yang diusulkan dapat ditingkatkan ke kurva biaya total dengan menambahkan biaya tidak

langsung. Dari kurva biaya total, pengambil keputusan dapat dengan mudah menemukan durasi proyek yang optimal yang mengarah pada total biaya minimum. Dalam algoritma juga tersedia durasi aktivitas optimal yang dapat digunakan untuk menyusun jadwal optimal dan melakukan perhitungan jalur kritis [8]. Dalam evaluasi kinerja metode heuristic dan metaheuristic masalah optimasi biaya dan waktu dalam skala besar, PSO memberikan alternatif yang efektif dan kuat untuk memecahkan masalah waktu optimasi biaya di dunia nyata. Namun dalam mencakup masalah skala besar yang mencakup 630 aktivitas pekerjaan dan hingga lima alternatif waktu mungkin memiliki batasan tertentu dalam mewakili kompleksitas beberapa proyek konstruksi [9].

Penerapan PSO kedalam TCTO terbukti efektif dan efisien dalam 3 kontribusi, yaitu: (1) Dapat menemukan bagian depan pareto dalam sekali menjalankan algoritma, oleh karena itu dapat membantu dalam mengambil keputusan mengevaluasi pro dan kontra dari semua solusi yang mungkin mempunyai efisiensi yang cukup besar [8]. (2) Algoritma memungkinkan semua jenis fungsi biaya waktu aktivitas yang ada: *Linier, non-linier, discrete, discontinuous*, atau *hybrid*. (3) Algoritma tidak bergantung pada pengukuran, karena itu bebas dari masalah penskalaan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir (*flowchart*) metodologi dalam pengerjaan jurnal ini dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk detail Algoritma PSO, dapat dilihat pada Gambar 3.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangunan Jalur Ganda Jalan Kereta Api Lintas Selatan Jawa KM 49+500 s/d KM 52+500 antara Mojokerto – Sepanjang 3 km' sp Lintas Surabaya – Solo, yang berlokasi di Kabupaten Mojokerto.

A. Analisis Aktivitas Sisa Pekerjaan

Proyek pembangunan Jalur Ganda Jalan Kereta Api Lintas Selatan Jawa KM 49+500 s/d KM 52+500 antara Mojokerto – Sepanjang Sepanjang 3 km' sp Lintas Surabaya - Solo merupakan proyek dari satuan kerja PP Jatim. Dimana proyek ini dikerjakan oleh sepuluh kontraktor utama dengan pembagian pada setiap segmen lokasi, Proyek yang dikerjakan oleh PT. Modern Surya Jaya hanya pada sepanjang 3 km pada KM 49+500 s/d KM 52+500 dari keseluruhan proyek dengan nilai kontrak sebesar Rp. 52.607.777.000,-. Akan tetapi proyek mengalami keterlambatan dikarenakan belum adanya persetujuan *shopdrawing* pekerjaan galian tanah dari pihak konsultan, sehingga pekerjaan galian mengalami keterlambatan dalam pelaksanaannya. Berdasarkan data kurva S (PT. Modern Surya Jaya, 2020) pada perencanaan bulan ketiga akhir tepatnya pada tanggal 4 Agustus 2021, *progress* yang telah direncanakan adalah sebesar 3,722% sedangkan *progress* yang sudah dicapai sebesar 1,513%. Keterlambatan proyek ini adalah 2,209%, memang bukan bobot persentase yang besar namun proyek tidak akan berjalan apabila pekerjaan galian pada pembangunan jalan kereta api mengalami keterlambatan. Jenis pekerjaan digunakan untuk tugas akhir yaitu hanya pada pekerjaan Jembatan karena merupakan batasan pada penelitian ini.

Dalam Kurva S milik proyek terdapat beberapa aktivitas yang dimulai setelah 7 hari dari aktivitas yang lain dimulai. Hal ini dikarenakan pihak dari kontraktor mengasumsikan bahwa setelah 7 hari pelaksanaan aktivitas proyek maka aktivitas yang lain juga bisa dilakukan dengan alasan pekerjaan yang dilakukan terbagi dari beberapa segmen area. Dari analisa aktifitas pekerjaan, didapatkan tiga lintasan kritis yang terjadi yang telah dituliskan pada Tabel 1.

B. Analisis Perhitungan

1) Perhitungan Normal Duration dan Normal Cost

Dalam menghitung *normal duration* dan *normal cost* akan menggunakan Microsoft Excel. Pada tugas akhir ini volume pekerjaan, jumlah pekerja, dan harga satuan pokok kegiatan (HSPK) yang digunakan untuk menghitung *normal duration* dan *normal cost* didapatkan dari pihak kontraktor (PT. Modern Surya Jaya). Analisa perhitungan total waktu normal didapatkan dari durasi normal setiap item pekerjaan. Hasil dari perhitungan *normal duration* dapat dilihat pada Tabel 2. dan untuk perhitungan dari *normal cost* dapat dilihat pada Tabel 3.

2) Perhitungan Crash Duration dan Crash Cost

Alternatif percepatan untuk mempercepat waktu penyelesaian proyek ditinjau dari kondisi lapangan. Alternatif yang digunakan adalah penambahan jam kerja sebanyak 4 jam, Jam kerja normal adalah jam 07.30-16.30 dengan waktu istirahat pada jam 12.00-13.00, jam kerja lembur adalah pada jam 16.30-20.30.

Pembayaran upah pekerja lembur per-jamnya sebesar dua kali upah pekerja. Hal ini berdasarkan KEPMEN No. 102 tahun 2004 tentang waktu kerja lembur dan upah kerja lembur. Oleh karena itu, upah pada saat jam kerja lembur adalah 200% dari upah normal. Produktivitas jam kerja normal adalah 8 jam dan produktivitas jam lembur adalah 4 jam, maka penulis mengasumsikan bahwa produktivitas kerja lembur adalah 60%.

Crash duration didapatkan dengan cara menghitung produktivitas per-jamnya dan produktivitas kerja lembur. Sedangkan hal yang diperlukan untuk menghitung *crash cost* adalah produktivitas total ketika ada penambahan jam lembur. Hasil perhitungan *crash duration* dan *crash cost* dapat dilihat pada Tabel 4. Sedangkan untuk perhitungan bisa didiapatkan dengan persamaan:

$$\text{Produktivitas kerja/hari} = \frac{1}{\text{koef.Pekerja}} \times \text{jumlah Pekerja} \quad (5)$$

$$\text{Produktivitas regu} = \frac{\text{Produktivitas Kerja/hari}}{\text{Jam Kerja Normal}} \quad (6)$$

$$\text{Produktivitas saat lembur} = 4 \times \text{Prod.kerja/hari} \times \text{koef.pengurangan produktivitas} \quad (7)$$

$$\text{Produktivitas setelah crashing} = \text{prod.normal} + \text{prod.lembur} \quad (8)$$

$$\text{Crash duration} = \frac{\text{Volume}}{\text{Produktivitas Setelah Crashing}} \quad (9)$$

$$\text{Upah pekerja per-jam} = \frac{\text{Harga Satuan Pekerjaan}}{\text{jam kerja normal}} \quad (10)$$

$$\text{Upah pekerja saat lembur} = 2 \times 4 \text{ jam} \times \text{upah/jam} \quad (11)$$

$$\text{Upah per-hari} = \text{upah pekerja} + \text{upah lembur gambar} \quad (12)$$

$$\text{Crash cost} = \text{upah/hari} \times \text{prod.setelah crashing} \times \text{crash duration} \quad (13)$$

3) Perhitungan Cost Slope

Untuk mendapatkan *cost slope* maka data yang dibutuhkan adalah durasi normal, biaya normal, durasi percepatan, dan biaya percepatan. Hasil perhitungan perhitungan *cost slope* dapat dilihat pada Tabel 4. Rumus perhitungan *cost slope* menggunakan persamaan:

$$\text{Cost Slope} = \frac{\text{crash cost} - \text{normal cost}}{\text{normal duration} - \text{normal cost}} \quad (14)$$

C. Analisis Waktu dan Biaya Hasil Percepatan

Dalam analisa waktu dan biaya dilakukan iterasi untuk mengkompresi pekerjaan pada aktivitas lain. Proses iterasi dilakukan pada aktivitas yang memiliki *cost slope* terendah. Iterasi dilakukan dengan menggunakan lintasan kritis, dengan syarat lintasan kritis tidak boleh memiliki durasi lebih kecil dari lintasan lain. Karena ada 3 lintasan kritis yang terjadi pada proyek, maka akan diiterasikan terlebih dahulu alternatif pekerjaan yang sama pada semua lintasan kritis dan diambil jumlah terbanyak. Ke-3 lintasan kritis dapat dilihat pada Tabel 4. Iterasi akan dihentikan jika lintasan kritis tidak dapat dipercepat. Durasi percepatan akan didapatkan dengan mengurangi durasi normal dengan waktu percepatan. Proses iterasi secara bertahap

Setelah dilakukan beberapa iterasi dengan *trial and error*. Iterasi hanya dapat dilakukan sampai iterasi ke-4 dengan pengurangan durasi sebesar 1 hari pada pekerjaan pengadaan mini pile square 25x25. Durasi perubahan proyek menjadi 266 hari.

Dengan dilakukannya *crashing*, maka biaya langsung pada proyek akan bertambah sedangkan biaya tidak langsung akan berkurang. Perhitungan total biaya akibat *crashing* dilakukan dengan menambahkan biaya langsung dengan *crash cost* kemudian ditambah biaya tidak langsung per hari yang telah dikurangi sesuai waktu percepatan. Biaya langsung sisa proyek sesuai perhitungan, yaitu sebesar Rp.23.036.343.653. Biaya langsung tersebut akan bertambah sebesar jumlah hari percepatan dikalikan *cost slope* dari aktivitas yang dipercepat. Berdasarkan data RAB, sisa biaya tidak langsung sebesar Rp. 5.551.145.347 atau sebesar Rp. 8.540.224 per hari yaitu 15% dari total biaya proyek (5% biaya *overhead*, 10% keuntungan). Biaya tidak langsung total akan dikurangi dengan biaya tidak langsung per hari dikalikan dengan jumlah hari percepatan. Total biaya proyek setelah dilakukan percepatan dapat dilihat pada Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat diketahui bahwa durasi optimum terjadi pada iterasi 1 dengan durasi percepatan 287 hari dengan total biaya sebesar Rp. 28.365.575.129.

D. Pemodelan PSO kedalam TCTO

Pada awalnya, algoritma PSO merupakan algoritma untuk menemukan posisi terbaik bagi makhluk hidup untuk bergerak dari satu posisi ke posisi lain. Namun hal ini yang menjadikannya bisa secara konsep untuk menentukan langkah terbaik bagi suatu penjadwalan dan juga mendapatkan biaya yang paling optimal.

Dalam PSO ada suatu fungsi yang disebut *objective function*, yang merupakan ekspresi matematis untuk mendeskripsikan hubungan dari parameter optimasi atau hasil sebuah operasi yang menggunakan parameter optimasi sebagai masukan. Nilai *constraint* (c_1, c_2) mempunyai nilai konstan yaitu positif dua ($c_1 = c_2 = 2$). Dalam analisis statistik atau teori probabilitas yang termasuk dalam PSO ada angka acak yang penting atau biasa disebut bilangan random (r_1, r_2).

Jumlah populasi yang dipakai pada penelitian ini adalah 100 populasi dengan 1000 jumlah iterasi. Batas *velocity* yang diambil adalah $V_{min} = -4$ dan $V_{max} = 4$. Untuk nilai $pbest$ adalah posisi partikel terbaik saat ini yang terus diulang-ulang hingga mendapatkan $gbest$ (posisi partikel terbaik secara keseluruhan selama iterasi dilakukan).

Objective function yang perlu diminimalisir merupakan *direct cost* dengan nilai x adalah durasi normal setiap pekerjaan. *Objective function* dapat dituliskan dengan persamaan:

$$f_x = \text{Normal Cost} + (\text{Upah pekerja per hari} + \text{Upah Lembur}) \cdot \text{prod setelah crashing} \cdot x \quad (15)$$

Untuk mengetahui ketepatan menggunakan algoritma PSO, diperlukan perhitungan lain yang selama ini digunakan yaitu menggunakan metode matematis atau manual. Dari hasil perhitungan *crash cost*, *crash duration*, dan *cost slope* menggunakan PSO dapat dilihat pada Tabel 6. Dan hasil percepatan menggunakan PSO dapat dilihat pada Tabel 7.

E. Diskusi dan Pembahasan

Hasil simulasi TCTO-PSO menunjukkan bahwa, durasi percepatan paling optimum adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.365.575.129, nilai ini hampir sama dengan perhitungan TCTO manual, dimana waktu percepatan optimum adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.464.546.260.

Tidak ada perbedaan durasi waktu percepatan optimal antara perhitungan TCTO manual dengan TCTO-PSO. Namun ada selisih 0.001% pada perhitungan biaya percepatan. Perbedaan ini sangat kecil sehingga bisa diabaikan, akan tetapi masih ada kesempatan peluang lebih baik bagi algoritma PSO. Hasil optimasi menggunakan PSO pada TCTO mempunyai persentase keberhasilan 60%.

Baik perhitungan TCTO manual maupun perhitungan TCTO-PSO, network schedule, durasi normal, durasi percepatan, biaya normal dan biaya percepatan harus dihitung terlebih dahulu sebagai input TCTO. Tanpa data data tersebut, proses perhitungan TCTO (baik manual maupun PSO) tidak dapat dilakukan.

Keuntungan penggunaan algoritma PSO adalah kecepatan perhitungan, karena *nature* dari PSO adalah global search, dimana PSO disiapkan untuk mencari solusi permasalahan

yang kompleks. Tentunya algoritma ini juga dapat digunakan untuk memecahkan schedule proyek yang kompleks seperti bangunan gedung bertingkat dan bangunan industri, seperti pabrik, power plant dsb.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa percepatan pada proyek Pembangunan Jalur Ganda Jalan Ka Lintas Selatan Jawa Km 49+500 Sd Km 52+500 Antara Mojokerto–Solo (Paket JGMS-9), maka dapat disimpulkan bahwa: (1) Algoritma Particle Swarm Optimization dapat digunakan/diimplementasikan untuk perhitungan Time Cost Trade Off Analysis (TCTO). (2) Durasi normal pada pekerjaan jembatan adalah 302 hari dengan biaya normal sebesar Rp. 23.036.343.652,-. Durasi percepatan proyek setelah dilakukan analisa *Time Cost Trade Off* (TCTO) dengan menggunakan metode matematis adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.365.575.129. (3) Durasi percepatan proyek setelah dilakukan analisa *Time Cost Trade Off* (TCTO) dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah 287 hari dengan biaya percepatan Rp. 28.464.546.260. (4) Analisa *Time Cost Trade Off* (TCTO) menggunakan metode matematis dan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) memiliki perbedaan yang sangat kecil (0.001%). Ini menunjukkan bahwa PSO bisa diaplikasikan untuk memecahkan masalah TCTO pada proyek konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. W. Halpin and R. W. Woodhead, *Construction Management*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [2] I. Widiasanti and Lenggogeni, *Manajemen Konstruksi*, 1st ed. Bandung: PT. Remaja Rosdakarya Offset, 2013.
- [3] P. L. A. Luthan and Syafrandi, *Aplikasi Microsoft Project untuk Penjadwalan Kerja Proyek Teknik Sipil*, 1st ed. Yogyakarta: CV Andi Offset, 2006.
- [4] A. B. Siswanto and M. A. Salim, *Manajemen Proyek*, 1st ed. Semarang: Pilar Nusantara, 2019.
- [5] A. Frederika, "Analisis percepatan pelaksanaan dengan menambah jam kerja optimum pada proyek konstruksi," *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 14, no. 2, 2010.
- [6] I. W. Ervianto, *Manajemen Proyek Konstruksi*, 1st ed. Yogyakarta: Penerbit Andi, 2006.
- [7] M. F. Tolangi, J. P. Rantung, J. E. C. Langi, and M. Sibi, "Analisis cash flow optimal pada kontraktor proyek pembangunan perumahan," *J. Sipil Statik*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [8] I.-T. Yang, "Using elitist particle swarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 133, no. 7, pp. 498–505, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:7(498).
- [9] S. Aminbakhsh and R. Sonmez, "Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time–cost trade-off problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 51, pp. 177–185, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2015.12.041.