

PENGGUNAAN METODE METAHEURISTIK DALAM OPTIMASI *TIME-COST TRADE OFF* DURASI PELAKSANAAN PROYEK KONSTRUKSI DENGAN PENAMBAHAN DAN PENGURANGAN TENAGA KERJA

Nicholas Rachmat¹, Tan Ferdinand Sugiarto², dan Doddy Prayogo³

ABSTRAK : Proyek konstruksi merupakan kumpulan aktivitas individual dengan berbagai batasan yang menyertainya. Secara umum terjadi *trade off* antara waktu (*time*) dan biaya (*cost*) dalam proyek konstruksi, dimana semakin murah biayanya semakin lama durasi pelaksanaan proyek. Untuk mendapatkan titik optimum pertukaran antara waktu dan biaya tersebut sebuah proyek dapat dipercepat dan diperlambat dari durasi penyelesaian normalnya dengan menggunakan sistem bonus dan denda yang dikenal di proyek konstruksi. Bonus akan diberikan jika proyek selesai lebih cepat daripada *deadline* sedangkan kontraktor juga akan terkena denda jika proyek terlambat. Karena proyek konstruksi memiliki banyak *variable* dan *constraints*, maka metode metaheuristik dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi *time-cost trade off* yang kompleks karena metaheuristik memiliki kemampuan untuk menyelesaikan permasalahan yang rumit dengan presisi yang tinggi secara efektif dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi durasi proyek guna menemukan titik optimal dalam *time-cost trade off* dengan dua algoritma metaheuristik, yaitu *particle swarm optimization* (PSO) dan *symbiotic organisms search* (SOS). Kedua algoritma digunakan untuk mengoptimasi kasus proyek gudang dengan durasi pelaksanaan normal selama 83 hari. Percepatan dan perlambatan durasi aktivitas akan dilakukan dengan cara menambah dan mengurangi tenaga kerja. Didapatkan bahwa proyek dapat dipercepat hingga 65 hari serta diperlambat hingga 113 hari dikarenakan batas keterlambatan yang diijinkan adalah 1 bulan dari durasi penyelesaian normal. Besar bonus dan denda per hari yang diberlakukan adalah sebesar 1% dari nilai kontrak. Dari hasil penelitian didapatkan opsi yang dapat diambil untuk optimasi *time-cost trade off*. Biaya optimal akan didapatkan jika proyek dipercepat menjadi 73 hari, dimana terjadi pengurangan biaya sebesar Rp208.548.212,00. Hasil optimasi juga menunjukkan bahwa SOS memiliki performa yang lebih baik dari PSO dari segi hasil terbaik, konvergensi, maupun konsistensi.

KATA KUNCI: optimasi, *time-cost trade off*, percepatan, perlambatan, tenaga kerja, metaheuristik

1. PENDAHULUAN

Proyek konstruksi merupakan kumpulan dari berbagai aktivitas individu serta batasan yang menyertai. Dalam proyek konstruksi dikenal sistem bonus (*reward*) dan denda (*penalty*) terhadap biaya pelaksanaan proyek. Kontraktor akan diberikan bonus jika proyek selesai lebih cepat daripada *deadline* dan terkena denda jika proyek mengalami keterlambatan. Besar bonus dan penalti ini sesuai dengan yang sudah ditentukan dalam kontrak sebelum pelaksanaan proyek (Lidwyna & Taufik, 2016). Secara umum, terjadi *trade off* antara *time* dan *cost* untuk menyelesaikan proyek konstruksi, dimana semakin murah biaya yang dihabiskan, semakin panjang durasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek tersebut (Feng & Liu, 1997). Karena proyek konstruksi memiliki banyak aktivitas, penyelesaian permasalahan *time cost trade-off* dapat dibantu dengan menggunakan optimasi berbasis metaheuristik. Metaheuristik

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416002@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416160@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, prayogo@petra.ac.id

menerapkan fenomena alam dan konsep pengacakan untuk mencari hasil optimum secara global dengan menggunakan *trial and error* dengan jumlah iterasi yang telah ditentukan (Cheng, Prayogo, Wu, & Lukito, 2016). Ada banyak macam algoritma metaheuristik yang dapat digunakan sehingga peneliti memutuskan untuk memilih 2 buah algoritma yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Symbiotic Organisms Search* (SOS). PSO merupakan algoritma yang paling sering digunakan dalam menyelesaikan permasalahan optimasi. Baru-baru ini juga ditemukan algoritma SOS yang terbukti cukup kuat dalam menyelesaikan permasalahan optimasi yang rumit (Cheng & Prayogo, 2014).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penjadwalan Proyek

Kunci utama keberhasilan melaksanakan proyek tepat waktu adalah perencanaan dan penjadwalan proyek yang lengkap dan tepat (Proboyo, 1999). Penjadwalan proyek dapat memberikan informasi tentang jadwal rencana dan kemajuan proyek dalam hal kinerja sumber daya berupa biaya, tenaga kerja, peralatan, dan material serta rencana durasi proyek dan progres waktu untuk penyelesaian proyek

2.2 Percepatan Durasi Pelaksanaan Proyek (*Crashing*)

Untuk menghindari terjadinya keterlambatan proyek maka dapat dilakukan percepatan durasi pelaksanaan dalam proyek konstruksi. Ada alternatif yang dapat diambil dalam memperpendek durasi kerja contohnya dengan penambahan jam kerja (sistem lembur) atau dengan penambahan tenaga kerja.

2.3 Sistem Bonus dan Penalti dalam Proyek Konstruksi

Dalam proyek konstruksi dikenal sistem bonus (*reward*) dan denda (*penalty*) terhadap biaya proyek. Kontraktor akan diberi bonus jika proyek selesai lebih cepat dari *deadline* dan terkena denda jika proyek mengalami keterlambatan. Besar bonus dan penalti ini bisa berbeda pada setiap proyek konstruksi karena disesuaikan dengan yang ditentukan dalam kontrak sebelum pelaksanaan proyek (Lidwyna & Taufik, 2016).

2.4 Optimasi Durasi Pelaksanaan

2.4.1 Variable

Variable yang dioptimasi dalam permasalahan ini adalah durasi dari aktivitas, yang terdiri atas durasi normal dan durasi ketika dilakukan percepatan dan perlambatan.

2.4.2 Constraints

Constraints merupakan batasan yang tidak boleh dilanggar dalam optimasi sebuah permasalahan. *Constraint* yang dipakai diambil dari penelitian mengenai optimasi percepatan durasi (Yang, 2006).

2.4.3 Objective function

Objective function adalah tujuan daripada optimasi, dimana objektif dari permasalahan adalah meminimalisir total biaya proyek setelah dilakukan perubahan pada durasi pelaksanaan.

2.5 Metode Optimasi Berbasis Metaheuristik

Masalah *time-cost trade off* proyek konstruksi merupakan masalah yang cukup kompleks untuk diselesaikan sehingga diperlukan metode untuk menyelesaikan optimasi demi mendapatkan hasil optimal dengan tingkat keakuratan yang cukup tinggi. Metaheuristik menjadi lebih populer daripada metode eksak karena lebih sederhana dan hasilnya lebih pasti dalam menyelesaikan permasalahan.

2.5.1 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO merupakan algoritma yang menirukan pergerakan dari kawanan burung atau ikan saat mencari makan (Eberhart & Kennedy, 1995) untuk mencari tempat makan terbaik. Pada PSO, lokasi ini merupakan solusi permasalahan. Lokasi selanjutnya ditentukan menggunakan kecepatan yang dipengaruhi oleh empat faktor yaitu: kecepatan partikel saat ini; lokasi terbaik yang pernah ditempati partikel; lokasi terbaik dari populasi dan lokasi partikel. Konsep sederhana dan mudah dipahami menjadi keunggulan algoritma ini. Kelemahannya adalah memiliki 3 parameter yang harus ditentukan diawal.

2.5.2 Symbiotic Organisms Search (SOS)

Algoritma SOS ditemukan oleh Cheng dan Prayogo pada tahun 2014 (Cheng & Prayogo, 2014). SOS merupakan salah satu algoritma yang simpel dan sangat kuat. SOS terinspirasi dari interaksi antar makhluk hidup yang disebut simbiosis. Algoritma SOS menggunakan tiga bentuk simbiosis yang paling sering ditemukan di alam yaitu simbiosis mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Dalam simbiosis mutualisme, dua organisme acak dipilih untuk berinteraksi secara mutualisme yang diharapkan dapat meningkatkan nilai kedua organisme tersebut. Hal serupa terjadi pada simbiosis komensalisme, hanya saja organisme kedua tidak mendapatkan keuntungan maupun kerugian dari hasil interaksi tersebut. Vektor parasit terbentuk dan menggantikan posisi dari suatu organisme apabila vektor parasit tersebut memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan nilai dari organisme inang parasit.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Proses Penelitian

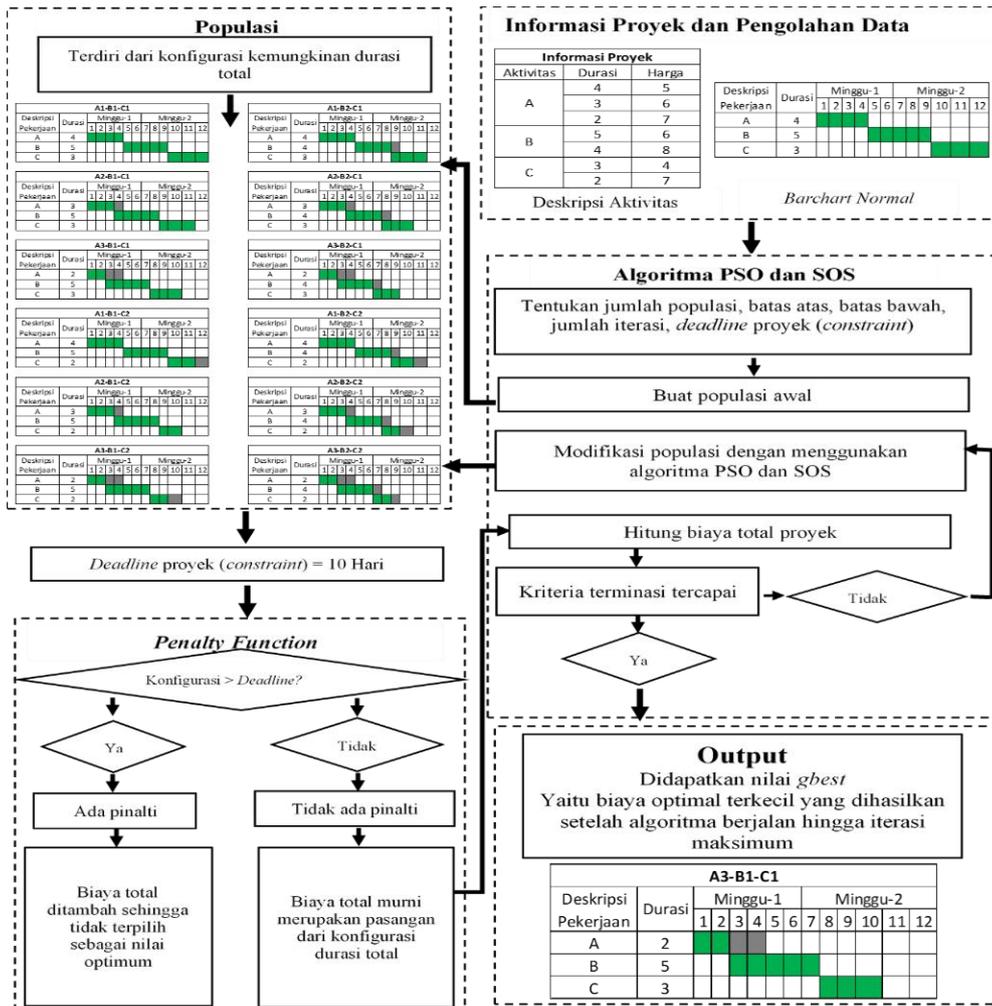
Seperti dapat dilihat pada **Gambar 1**, pertama-tama peneliti menghitung durasi dan biaya setiap aktivitas jika dilakukan percepatan dan perlambatan durasi aktivitas sebagai *input* dalam program MATLAB 2017b. Setelah itu data yang telah dimasukkan akan dioptimasi menggunakan algoritma metaheuristik *PSO* dan *SOS*. Dari data yang ada maka algoritma metaheuristic akan membuat suatu populasi awal dan diambil sebuah sampel secara acak yang akan dihadapkan dengan *constraint*, jika sampel tersebut melanggar *constraint* maka akan diberikan suatu *penalty function* yang bertujuan untuk mengeliminasi sampel tersebut agar tidak terpilih menjadi solusi, namun jika sampel tersebut tidak melanggar *constraint* maka biaya dari sampel tersebut dapat digunakan sebagai biaya total proyek. Siklus ini akan berjalan terus menerus hingga kriteria terminasi telah tercapai dan didapatkan suatu nilai *gbest* yang menunjukkan biaya minimum proyek sebagai *output*.

3.2. Teknik Pengolahan Data

Data yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah hasil optimasi berupa durasi penyelesaian dan biaya penyelesaian proyek dari algoritma *PSO* dan *SOS* untuk kasus proyek konstruksi yang diambil. Kasus penelitian merupakan pembangunan gudang oleh PT. Graha Putra Persada yang berlokasi di Jember, Jawa Timur. Durasi penyelesaian normal daripada gudang untuk bagian struktural adalah 83 hari dengan biaya total sebesar Rp20.081.129.329,00 dengan rincian biaya seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Rincian Biaya Pekerjaan Struktural Pembangunan Gudang

| Jenis Pekerjaan | Biaya | Bobot |
|--|--------------------|---------|
| Pekerjaan Tanah | Rp. 1,011,887,686 | 5.039% |
| Pekerjaan Beton Bertulang | Rp. 7,169,904,516 | 35.705% |
| Pekerjaan Pasangan dan Plesteran | Rp. 1,594,569,362 | 7.941% |
| Pekerjaan Konstruksi Baja dan Penutup Atap | Rp. 10,304,767,766 | 51.316% |
| Total | Rp. 20,081,129,329 | 100% |



Gambar 1. Diagram Alir Optimasi Percepatan Durasi

Pada kasus yang ditinjau ini, menggunakan sistem pekerja borongan dimana dalam satu macam lingkup pekerjaan menggunakan jumlah pekerja yang sama tiap hari. Rincian kebutuhan pekerja dapat dilihat pada **Tabel 2**. Dalam hal percepatan durasi, batasan yang digunakan dalam mempercepat durasi aktivitas adalah ketika jumlah pekerja per hari saat dipercepat mencapai 1,5 kali daripada jumlah pekerja per hari durasi. Sedangkan dalam hal perlambatan durasi, batasannya adalah jumlah pekerja mencapai 0,5 kali pekerja harian durasi normal. Besar bonus dan denda yang diberikan adalah sebesar 0,1% dari nilai kontrak durasi normal yaitu Rp20.081.129,00/hari dengan batasan pemberian bonus sebesar 1%. Hal ini berarti setelah bonus mencapai 1% maka tidak ada kenaikan untuk besar persenan bonus yang diberikan.

Tabel 2. Harga Pekerja dan Kebutuhan Pekerja

| Jenis Pekerjaan | Jumlah Pekerja/Hari |
|--|---------------------|
| Pekerjaan Tanah | 40 |
| Pekerjaan Beton Bertulang | 60 |
| Pekerjaan Pasangan dan Plesteran | 15 |
| Pekerjaan Konstruksi Baja dan Penutup Atap | 25 |
| Harga Pekerja/Hari | Rp. 125,000 |

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1. Hasil Optimal *Time-Cost Trade Off*

Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan hasil optimasi dari algoritma PSO dan SOS untuk seluruh kemungkinan durasi penyelesaian yang berkisar antara 65 hingga 113 hari. SOS memiliki performa yang paling baik karena dapat menghasilkan standar deviasi yang lebih kecil daripada PSO pada setiap *deadline* penyelesaian yang diuji. PSO dan SOS mampu menghasilkan nilai optimum *time-cost trade off* yang sama yaitu pada titik *deadline* 73 hari.

Tabel 3. Hasil Optimasi Algoritma PSO

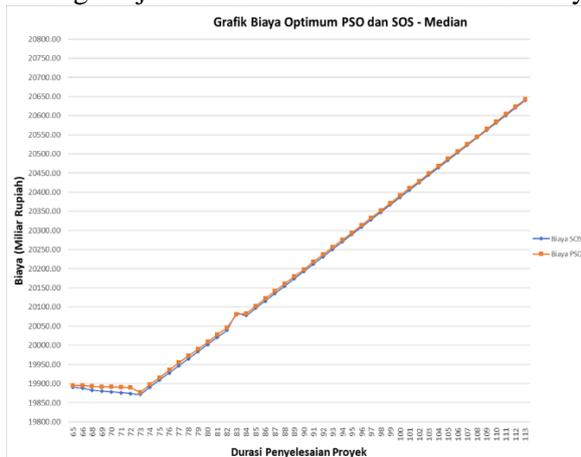
| Deadline Penyelesaian Proyek (Hari) | Biaya Total Proyek Hasil Algoritma PSO Dalam Satuan Jutaan Rupiah | | | | |
|---|--|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | Terbaik | Terburuk | Rata-rata | Median | Standar Deviasi |
| 65 | 19894.165 | 19897.436 | 19895.479 | 19895.145 | 0.9337 |
| 66 | 19893.065 | 19896.262 | 19894.655 | 19894.615 | 0.8272 |
| 67 | 19892.627 | 19895.521 | 19893.791 | 19893.793 | 0.7461 |
| 68 | 19891.448 | 19894.563 | 19892.805 | 19892.746 | 0.8009 |
| 69 | 19890.973 | 19893.736 | 19891.971 | 19891.985 | 0.7050 |
| 70 | 19889.796 | 19892.486 | 19891.004 | 19891.114 | 0.7806 |
| 71 | 19889.213 | 19893.472 | 19890.612 | 19890.312 | 1.0422 |
| 72 | 19874.843 | 19902.660 | 19887.379 | 19889.312 | 9.8737 |
| 73 | 19872.693 | 19902.520 | 19883.266 | 19876.581 | 11.0460 |
| 74 | 19892.399 | 19921.633 | 19903.064 | 19897.112 | 10.2367 |
| 75 | 19910.130 | 19941.072 | 19919.759 | 19915.068 | 10.4911 |
| 76 | 19929.836 | 19959.155 | 19940.090 | 19935.387 | 10.1115 |
| 77 | 19946.918 | 19977.221 | 19958.045 | 19954.405 | 9.3883 |
| 78 | 19967.624 | 20000.249 | 19978.833 | 19972.236 | 11.6021 |
| 79 | 19985.830 | 20016.098 | 19994.670 | 19989.505 | 9.6893 |
| 80 | 20004.724 | 20032.757 | 20012.199 | 20008.380 | 8.5324 |
| 81 | 20024.617 | 20054.972 | 20030.137 | 20027.480 | 8.1068 |
| 82 | 20041.573 | 20050.923 | 20046.062 | 20046.198 | 2.1206 |
| 83 | 20081.129 | 20081.129 | 20081.129 | 20081.129 | - |
| 84 | 20079.860 | 20087.711 | 20082.779 | 20082.360 | 1.6943 |
| 85 | 20098.567 | 20107.192 | 20101.953 | 20101.711 | 2.1761 |
| 86 | 20120.123 | 20130.123 | 20122.507 | 20122.198 | 2.0766 |
| 87 | 20137.479 | 20145.579 | 20141.597 | 20141.416 | 2.0649 |
| 88 | 20157.560 | 20164.248 | 20160.264 | 20160.360 | 1.4699 |
| 89 | 20176.266 | 20183.991 | 20179.951 | 20179.766 | 1.9134 |
| 90 | 20195.597 | 20205.097 | 20198.555 | 20198.285 | 1.9753 |
| 91 | 20215.053 | 20223.178 | 20218.404 | 20217.991 | 2.1182 |
| 92 | 20233.134 | 20241.985 | 20237.263 | 20237.291 | 1.8874 |
| 93 | 20252.966 | 20259.816 | 20256.147 | 20256.298 | 1.5451 |
| 94 | 20272.672 | 20279.985 | 20275.671 | 20275.360 | 1.8541 |
| 95 | 20291.003 | 20297.629 | 20294.179 | 20293.941 | 1.7249 |
| 96 | 20310.835 | 20319.898 | 20313.965 | 20313.697 | 2.0892 |
| 97 | 20330.041 | 20336.541 | 20332.927 | 20332.966 | 1.7741 |
| 98 | 20349.122 | 20355.371 | 20352.483 | 20352.497 | 1.4155 |
| 99 | 20368.828 | 20375.515 | 20371.694 | 20371.703 | 1.4515 |
| 100 | 20387.909 | 20394.759 | 20390.992 | 20391.034 | 1.7535 |
| 101 | 20407.490 | 20413.365 | 20410.134 | 20410.115 | 1.4659 |
| 102 | 20426.572 | 20433.547 | 20429.434 | 20429.009 | 1.6143 |
| 103 | 20446.278 | 20455.215 | 20449.100 | 20448.640 | 2.0794 |
| 104 | 20465.859 | 20472.084 | 20468.260 | 20468.159 | 1.3480 |
| 105 | 20485.565 | 20490.940 | 20487.471 | 20487.190 | 1.3320 |
| 106 | 20504.584 | 20507.896 | 20506.344 | 20506.334 | 0.9503 |
| 107 | 20524.352 | 20528.602 | 20526.018 | 20525.702 | 1.1428 |
| 108 | 20543.308 | 20546.808 | 20545.061 | 20545.046 | 0.8848 |
| 109 | 20562.889 | 20568.739 | 20564.723 | 20564.471 | 1.2612 |
| 110 | 20582.471 | 20587.071 | 20584.128 | 20583.971 | 1.1683 |
| 111 | 20601.927 | 20606.677 | 20603.666 | 20603.677 | 1.2531 |
| 112 | 20621.508 | 20625.633 | 20623.281 | 20623.257 | 1.1155 |
| 113 | 20640.777 | 20644.339 | 20642.804 | 20642.589 | 1.0478 |

Tabel 4. Hasil Optimasi Algoritma SOS

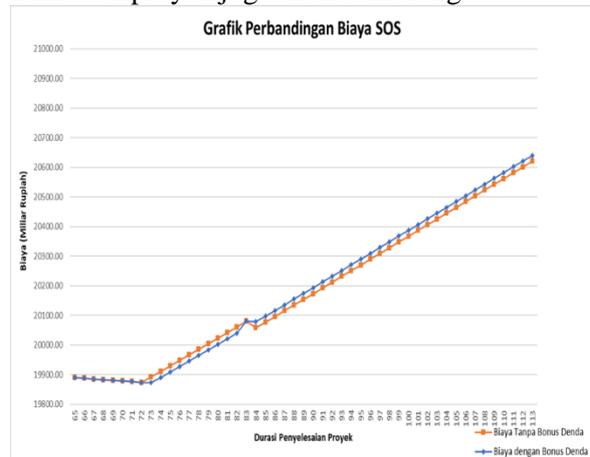
| Deadline Penyelesaian Proyek | Biaya Total Proyek Hasil Algoritma SOS | | | | |
|---------------------------------|--|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | Dalam Satuan Jutaan Rupiah | | | | |
| (Hari) | Terbaik | Terburuk | Rata-rata | Median | Standar Deviasi |
| 65 | 19890.131 | 19891.131 | 19890.164 | 19890.131 | 0.1826 |
| 66 | 19887.631 | 19888.631 | 19887.703 | 19887.631 | 0.2326 |
| 67 | 19885.131 | 19885.881 | 19885.194 | 19885.131 | 0.2004 |
| 68 | 19882.631 | 19884.631 | 19882.803 | 19882.631 | 0.4594 |
| 69 | 19880.131 | 19881.256 | 19880.323 | 19880.131 | 0.3666 |
| 70 | 19877.631 | 19879.631 | 19878.140 | 19878.256 | 0.5198 |
| 71 | 19875.531 | 19877.756 | 19876.288 | 19876.269 | 0.5970 |
| 72 | 19873.656 | 19876.631 | 19874.361 | 19874.006 | 0.6916 |
| 73 | 19871.781 | 19873.906 | 19872.659 | 19872.581 | 0.6343 |
| 74 | 19890.112 | 19891.837 | 19890.746 | 19890.725 | 0.4083 |
| 75 | 19908.443 | 19910.793 | 19909.294 | 19909.243 | 0.5918 |
| 76 | 19926.900 | 19928.625 | 19927.757 | 19927.700 | 0.4057 |
| 77 | 19945.606 | 19947.356 | 19946.382 | 19946.456 | 0.4531 |
| 78 | 19964.437 | 19965.412 | 19964.893 | 19964.687 | 0.4001 |
| 79 | 19983.268 | 19984.368 | 19983.600 | 19983.393 | 0.3552 |
| 80 | 20002.099 | 20003.199 | 20002.464 | 20002.349 | 0.3660 |
| 81 | 20021.055 | 20022.030 | 20021.237 | 20021.180 | 0.2694 |
| 82 | 20039.886 | 20040.861 | 20040.089 | 20040.011 | 0.2367 |
| 83 | 20081.129 | 20081.129 | 20081.129 | 20081.129 | - |
| 84 | 20078.049 | 20079.024 | 20078.363 | 20078.236 | 0.2945 |
| 85 | 20096.755 | 20097.630 | 20097.076 | 20097.130 | 0.2856 |
| 86 | 20115.961 | 20116.836 | 20116.169 | 20116.023 | 0.2550 |
| 87 | 20135.167 | 20136.042 | 20135.429 | 20135.417 | 0.2136 |
| 88 | 20154.498 | 20155.373 | 20154.694 | 20154.623 | 0.2405 |
| 89 | 20173.829 | 20174.579 | 20173.938 | 20173.892 | 0.1599 |
| 90 | 20193.035 | 20193.911 | 20193.306 | 20193.161 | 0.2253 |
| 91 | 20212.366 | 20212.866 | 20212.538 | 20212.492 | 0.1371 |
| 92 | 20231.573 | 20232.448 | 20231.869 | 20231.823 | 0.1751 |
| 93 | 20250.904 | 20251.529 | 20251.175 | 20251.154 | 0.1471 |
| 94 | 20270.236 | 20271.236 | 20270.585 | 20270.548 | 0.1840 |
| 95 | 20289.567 | 20290.192 | 20289.887 | 20289.941 | 0.1528 |
| 96 | 20309.023 | 20309.648 | 20309.289 | 20309.273 | 0.1495 |
| 97 | 20328.354 | 20328.854 | 20328.646 | 20328.604 | 0.1327 |
| 98 | 20347.810 | 20348.435 | 20348.098 | 20348.060 | 0.1613 |
| 99 | 20367.266 | 20368.141 | 20367.470 | 20367.516 | 0.1899 |
| 100 | 20386.472 | 20387.222 | 20386.868 | 20386.847 | 0.1972 |
| 101 | 20405.928 | 20406.928 | 20406.383 | 20406.303 | 0.2489 |
| 102 | 20425.385 | 20426.135 | 20425.743 | 20425.697 | 0.2043 |
| 103 | 20444.966 | 20445.591 | 20445.245 | 20445.216 | 0.1818 |
| 104 | 20464.297 | 20465.172 | 20464.730 | 20464.672 | 0.2537 |
| 105 | 20483.753 | 20484.503 | 20484.207 | 20484.253 | 0.2262 |
| 106 | 20503.334 | 20504.084 | 20503.651 | 20503.584 | 0.2537 |
| 107 | 20522.790 | 20523.790 | 20523.240 | 20523.290 | 0.3072 |
| 108 | 20542.371 | 20543.371 | 20542.801 | 20542.871 | 0.3143 |
| 109 | 20561.953 | 20562.952 | 20562.211 | 20562.202 | 0.2823 |
| 110 | 20581.534 | 20582.409 | 20581.704 | 20581.534 | 0.2378 |
| 111 | 20600.990 | 20601.740 | 20601.298 | 20601.177 | 0.2292 |
| 112 | 20620.571 | 20621.571 | 20620.892 | 20620.821 | 0.2740 |
| 113 | 20640.152 | 20641.027 | 20640.506 | 20640.277 | 0.3349 |

Gambar 2 menunjukkan grafik perbandingan biaya optimum algoritma PSO dan SOS yang menunjukkan bahwa SOS mampu menghasilkan biaya lebih optimum karena pada setiap *deadline*, biaya yang dihasilkan oleh SOS lebih rendah dari hasil PSO. Maka dengan mengacu pada hasil optimasi SOS yang ditampilkan pada Gambar 4.1, didapatkan durasi yang dapat digunakan dalam optimasi *time-cost trade off*. Jika proyek ingin dipercepat maka titik optimal penyelesaian proyek adalah dengan memakai durasi pelaksanaan 73 hari yang memakan biaya sebesar Rp19.872.581.117,00, ini berarti dari biaya penyelesaian normal ada pengurangan sebesar Rp208.548.212,00. Sedangkan **Gambar 3** menunjukkan grafik perbandingan biaya proyek dengan dan tanpa bonus serta denda. Grafik tersebut menunjukkan

jika tidak ada sistem bonus maka biaya ketika penyelesaian proyek dipercepat menjadi lebih besar sedangkan jika tidak ada sistem denda maka biaya perlambatan proyek juga akan berkurang.



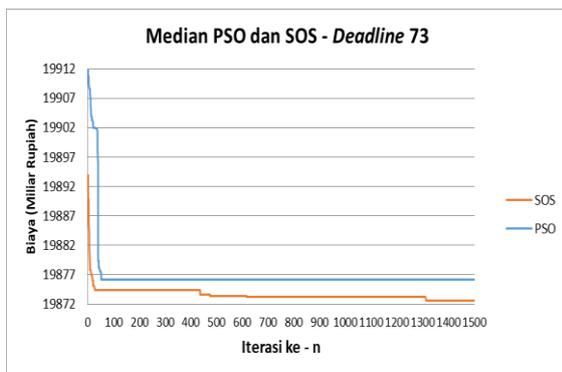
Gambar 2. Grafik perbandingan biaya optimum PSO dan SOS untuk *run* median



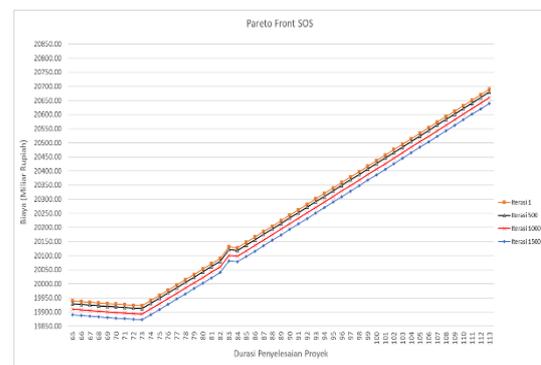
Gambar 3. Grafik perbandingan biaya SOS dengan dan tanpa bonus serta denda

4.2. Grafik Konvergensi dan Pareto Front

Gambar 4 menunjukkan grafik konvergensi hasil *run* median untuk *deadline* 73 hari yang merupakan titik optimal *time-cost trade off*. Dapat dilihat SOS memiliki kinerja yang lebih stabil dikarenakan mampu menghasilkan nilai standar deviasi yang lebih kecil daripada PSO. Algoritma SOS mampu menghasilkan nilai konvergensi yang lebih cepat yaitu disekitar iterasi ke-50, sedangkan algoritma PSO membutuhkan sekitar 100 iterasi sebelum menghasilkan nilai yang konvergen. Ilustrasi penggambaran optimasi algoritma SOS dapat dilihat pada Gambar 5 yang menunjukkan *Pareto Front* mulai dari iterasi pertama hingga iterasi ke-1500. Gambar tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan biaya dioptimalkan oleh SOS seiring dengan bertambahnya iterasi yang digambarkan melalui penurunan grafik biaya total proyek.



Gambar 4. Grafik konvergensi hasil *run* untuk *deadline* 73 hari



Gambar 5. Pareto front algoritma SOS median untuk *run* median

4.3. Decision Making Variable untuk Deadline 73 Hari

Dalam Tabel 5 dapat dilihat *decision making variable* optimasi yaitu aktivitas-aktivitas dari studi kasus yang ditinjau. Dalam tabel tersebut dapat dilihat perbandingan dari durasi normal setiap aktivitas dan durasi untuk *deadline* 73 hari yang merupakan titik optimum dari *time-cost trade off*. Hasil konfigurasi durasi aktivitas tersebut diambil dengan mengacu pada nilai median untuk *deadline* 73 hari dari algoritma SOS yang juga merupakan acuan untuk grafik lainnya. Setiap aktivitas memiliki kemungkinan perubahan durasi aktivitas yang berbeda-beda, dimana aktivitas dapat dipercepat maupun diperlambat.

Tabel 5. Perbandingan Durasi Normal dan *Deadline* 73 hari serta Perubahan Biaya

| No | Jenis Aktivitas | Durasi Normal | Biaya Normal | Durasi <i>Deadline</i> 73 Hari | Biaya <i>Deadline</i> 73 Hari | Perubahan Biaya |
|---|--|---------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| PEKERJAAN PERSIAPAN | | | | | | |
| - | Pekerjaan Persiapan Civil & Finishing Bangunan Utama Gudang | 12 | Rp519.253.500,00 | 12 | Rp519.253.500,00 | - |
| PEKERJAAN TANAH | | | | | | |
| 1 | Setting out, pengukuran & pasang bowplank | 1 | Rp35.000.000,00 | 2 | Rp32.500.000,00 | - Rp2.500.000,00 |
| - | Pekerjaan Pondasi Bore Pile | 5 | - | 5 | - | - |
| 2 | Galian tanah pondasi, tie beam & Retaining Wall | 3 | Rp48.711.240,00 | 3 | Rp48.711.240,00 | - |
| 3 | Perataan dan pematatan tanah eks galian pondasi | 1 | Rp12.177.580,00 | 2 | Rp9.677.580,00 | - Rp2.500.000,00 |
| 4 | Penghamparan & pemindahan sisa tanah galian, dalam area lahan | 1 | Rp36.533.200,00 | 2 | Rp34.033.200,00 | - Rp2.500.000,00 |
| 5 | Pekerjaan urugan | 8 | Rp756.068.386,00 | 16 | Rp753.568.386,00 | - Rp2.500.000,00 |
| 6 | Pekerjaan pematatan | 5 | Rp123.397.280,00 | 10 | Rp120.897.280,00 | - Rp2.500.000,00 |
| PEKERJAAN BETON BERTULANG | | | | | | |
| 7 | Beton Mutu K400 slump 9,0 cm (plus / minus 1,0 cm) NFA. Untuk Slab on Grade | 11 | Rp2.065.811.920,00 | 19 | Rp2.062.686.920,00 | - Rp3.125.000,00 |
| 8 | Beton Mutu K300 slump 10 cm (plus / minus 2,0 cm) FA. Untuk pilecap/pedestal | 5 | Rp391.977.105,00 | 4 | Rp392.352.105,00 | + Rp375.000,00 |
| 9 | Beton K 175. Untuk pengisi kolom WF | 4 | Rp196.878.000,00 | 8 | Rp193.128.000,00 | - Rp3.750.000,00 |
| 10 | Beton Mutu Bo. Untuk lantai kerja (screeding), tebal 5 Cm | 5 | Rp473.008.568,00 | 5 | Rp473.008.568,00 | - |
| 11 | Besi tulangan Ulinr dia. >= 10 mm BJTD 39 | 6 | Rp798.545.042,00 | 5 | Rp799.795.042,00 | + Rp1.250.000,00 |
| 12 | Besi tulangan Polos dia. <= 8 mm BJTP 24 | 3 | Rp168.934.565,00 | 2 | Rp169.559.565,00 | + Rp625.000,00 |
| 13 | Wire mesh mutu Fy = 550 Mpa untuk lantai slab on grade | 3 | Rp2.308.672.604,00 | 3 | Rp2.308.672.604,00 | - |
| 14 | Bekisting normal | 10 | Rp690.424.162,00 | 8 | Rp692.049.162,00 | + Rp1.625.000,00 |
| 15 | Bekisting Khusus, Relat & Material leveling. Untuk Slab on Grade | 5 | Rp75.652.550,00 | 4 | Rp76.027.550,00 | + Rp375.000,00 |
| PEKERJAAN PASANGAN DAN PLESTERAN | | | | | | |
| 16 | Pasangan dinding Bata Ringan, 60x20x10 cm. Eks. SCG, Java celcon, Power Block | 42 | Rp1.585.035.362,00 | 30 | Rp1.584.715.362,00 | + Rp375.000,00 |
| 17 | Pasangan Batu alam (Andesit 200x200mm). Untuk Finishing Tangga | 4 | Rp9.534.000,00 | 7 | Rp8.216.000,00 | - Rp1.318.000,00 |
| PEKERJAAN KONSTRUKSI BAJA DAN PENUTUP ATAP | | | | | | |
| 18 | Kolom | 10 | Rp3.078.924.976,00 | 7 | Rp3.080.299.976,00 | + Rp1.375.000,00 |
| 19 | Rafter Baja Rangka Atap | 8 | Rp2.237.713.886,00 | 6 | Rp2.238.838.386,00 | + Rp1.125.000,00 |
| 20 | Lintol / Sokong kolom /Balok Sekunder | 3 | Rp399.619.912,00 | 2 | Rp401.244.912,00 | + Rp1.625.000,00 |
| 21 | Rangka RS.1 | 3 | Rp118.428.638,00 | 2 | Rp118.928.638,00 | + Rp500.000,00 |
| 22 | Rangka Canopy - 1 | 4 | Rp311.164.938,00 | 3 | Rp311.914.938,00 | + Rp750.000,00 |
| 23 | Rangka Canopy - 2 | 1 | Rp54.490.344,00 | 1 | Rp54.490.344,00 | - |
| 24 | Gording (Purlin) Atap & Canopy | 4 | Rp872.365.657,00 | 3 | Rp873.240.657,00 | + Rp875.000,00 |
| 25 | Rangka fascia Atap | 2 | Rp99.925.354,00 | 2 | Rp99.925.354,00 | - |
| 26 | Rangka Flashing | 2 | Rp16.160.160,00 | 2 | Rp16.160.160,00 | - |
| 27 | Bracing | 3 | Rp151.760.493,00 | 2 | Rp153.385.493,00 | + Rp1.625.000,00 |
| 28 | Trekstank / Drat Ties, lengkap dengan mur & baut | 4 | Rp36.820.000,00 | 3 | Rp37.070.000,00 | + Rp250.000,00 |
| 29 | Pelat Sambung (Connection Plate) & Stiffener Plate (Untuk penghubung kolom dan rafter) | 3 | Rp508.775.517,00 | 3 | Rp508.775.517,00 | - |
| 30 | Angkur & Baut | 1 | Rp143.400.000,00 | 2 | Rp142.475.000,00 | - Rp925.000,00 |
| 31 | Grouting Baseplate Kolom | 1 | Rp12.100.000,00 | 2 | Rp11.525.000,00 | - Rp575.000,00 |
| 32 | Penutup Atap & Facia, sesuai gambar dan spesifikasi | 7 | Rp2.208.578.611,00 | 5 | Rp2.209.828.611,00 | + Rp1.250.000,00 |
| 33 | Insect screen (Stainless Mesh 5x5x1mm), berikut rangka siku L40x40x3 + Plat Strip, sesuai gambar. A-FB-JB-1.11 | 2 | Rp54.540.000,00 | 2 | Rp54.540.000,00 | - |
| Total Biaya | | | Rp20.081.129.329,00 | - | Rp20.074.197.329,00 | - Rp6.932.000,00 |

5. KESIMPULAN

- Jika pihak kontraktor atau *owner* ingin mempercepat durasi proyek, maka dapat dipilih opsi penyelesaian 73 hari yang mampu mengurangi biaya dengan optimal sebesar Rp208.548.212,00. Pengurangan biaya ini terjadi karena bonus yang diberikan untuk waktu penyelesaian proyek yang cepat lebih besar daripada penambahan biaya yang dibutuhkan dalam menambah tenaga kerja.
- Ditinjau dari segi biaya terbaik, terburuk, median, dan rata-rata, SOS menghasilkan biaya lebih baik daripada PSO. SOS juga menghasilkan t konsistensi yang lebih tinggi karena memiliki standar deviasi yang lebih kecil serta menghasilkan nilai konvergensi yang lebih cepat dari algoritma PSO.

6. DAFTAR REFERENSI

- Cheng, M., Prayogo, D., Wu, Y., & Lukito, M. M. (2016). A Hybrid Harmony Search Algorithm for Discrete Sizing Optimization of Truss Structure. *Automation in Construction*, 69, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.023>
- Cheng, M. Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm. *Computers and Structures*, 139, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43.
- Feng, C. W., & Liu, L. (1997). Using Genetic Algorithms to Solve Connection Time-Cost Trade Off Problems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, (11), 184-189.
- Lidwyna, F., & Taufik, H. (2016). Analisis Percepatan Keterlambatan Proyek (Study Kasus : Kantor Dinas SKPD Pemko Gedung B2 di Tenayan Raya). *Jom FTEKNIK Volume 3 No.2 Oktober 2016*.
- Proboyo, B. (1999). Keterlambatan Waktu Pelaksanaan Proyek: Klasifikasi dan Peringkat dari Penyebab-Penyebabnya. *Dimensi Teknik Sipil Volume 1 Nomor 2 September 1999*, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>
- Yang, I. (2006). Performing Complex Project Crashing Analysis with Aid of Particle Swarm Optimization Algorithm. *International Journal of Project Management* 25 (2007), 637-646. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.001>