

OPTIMASI *TRIM LOSS* PEMBESIAN BETON BERTULANG DENGAN METODE *METAHEURISTIK PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* DAN *SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH*

Renaldy Gozal¹, Doddy Prayogo²

¹ Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia

² Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia

¹ b21180014@john.petra.ac.id, ² prayogo@petra.ac.id

ABSTRAK: Kebutuhan pembesian umumnya diuraikan dalam *bar bending schedule*. Pemotongan baja tulangan beton yang tidak efisien dapat menyebabkan *waste* berupa *trim loss* yang mengakibatkan berkurangnya keuntungan serta berdampak pada lingkungan. Optimasi ini diperlukan guna meminimalisir *trim loss* yang dihasilkan dari pemotongan. Sebelumnya, telah dilakukan penelitian mengenai optimasi *waste* dengan metode metaheuristik dan mengembangkan metode pembentukan *cutting pattern*. Namun, apabila variasi terlalu banyak, metode ini akan menghasilkan *cutting pattern* yang banyak. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menyelesaikan masalah optimasi dengan menghasilkan *cutting pattern* yang efisien dan *trim loss* minimum. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah proyek nyata kantor. Pada prosesnya metode *particle swarm optimization* dan *symbiotic organisms search* akan dibandingkan dengan metode *cutting pattern* dan kondisi yang berbeda. Performa dari kedua metode dinilai dari hasil minimum, maksimum, rata-rata, standar deviasi dan grafik konvergensi setiap iterasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *symbiotic organisms search* dengan kondisi *undersupply* berhasil menemukan solusi terbaik.

Kata kunci: *bar bending schedule*, *trim loss*, optimasi, metaheuristik

ABSTRACT: *Steel rebar stated in form of bar bending schedule. Inefficient cutting of steel rebar can result waste, which cause profit loss and impact to environment. The optimization is necessary to minimize the trim loss. Previously, there has been studies on trim loss optimization using metaheuristic methods and cutting pattern generator. However, if the length variation is too many, cutting pattern generator will produce large number of cutting patterns. Therefore, this study aims to solve the problem by producing efficient cutting pattern while obtaining minimum trim loss. This study is using real-life office project data and will be comparing the performance of both particle swarm optimization and symbiotic organisms search from each cutting patterns generators and conditions. Also, assess the performance of both methods from the minimum, maximum, average, standard deviation and the convergence graph of each iteration. The result shows that symbiotic organisms search performed better on undersupply condition.*

Keywords: *bar bending schedule*, *trim loss*, *optimization*, *metaheuristic*

1. PENDAHULUAN

Material dalam proyek konstruksi merupakan salah satu komponen yang penting dalam menentukan besarnya biaya. Kontribusi material dalam aspek biaya bisa mencapai 40% hingga 60% dari total biaya proyek (Ritz, 1994). Di antara keseluruhan material, pembesian dalam beton bertulang (*reinforcement steel bar/rebar*) memiliki kontribusi sebanyak 54% (Elfahham, 2019). Berarti pembesian dalam beton bertulang pada sebuah proyek memiliki kontribusi hingga 30% dari total keseluruhan biaya proyek. Selain meningkatkan profitabilitas sebuah proyek, meminimalisir *waste* pada baja tulangan beton (*trim loss*) juga menguntungkan secara lingkungan (Melhem et al., 2021). Menurut Global ABC (2019), industri konstruksi pada tahun 2018 berkontribusi atas 36% dari pemakaian energi dan emisi karbondioksida (CO₂) sebesar 39% di bumi. Dari total keseluruhan pemakaian energi dan emisi rumah kaca untuk struktur beton sebesar 65%, baja tulangan beton memiliki andil sebesar 25% (Lee et al., 2020).

Metode metaheuristik adalah strategi yang memandu proses pencarian solusi optimal secara iteratif sesuai dengan fungsi objektifnya (Prayogo et al., 2018). Metaheuristik memberikan solusi yang dapat diterima dengan waktu yang masuk akal untuk memecahkan masalah yang kompleks dan sulit di bidang sains dan teknik (Talbi, 2009). Metode ini mampu menghasilkan penyelesaian yang baik dalam waktu yang cepat, tetapi tidak menjamin bahwa penyelesaian yang dihasilkan merupakan solusi yang paling tepat.

Dalam beberapa tahun terakhir penelitian telah dilakukan dalam bidang optimasi untuk meminimalisir *trim loss* dalam pemotongan baja tulangan beton menggunakan metode metaheuristik *genetic algorithm* (GA), *linear programming* (LP), dan *integer programming* (IP) (Salem et al., 2007). Optimasi *one dimensional cutting stock problem* (1D-CSP) dengan metode metaheuristik merupakan optimasi *single-objective* sehingga menghasilkan sebuah set solusi pola-pola pemotongan baja tulangan beton.

Seiring dengan berjalannya waktu, dilaporkan bahwa metode metaheuristik *sybiotic organisms search* (SOS) lebih unggul dibandingkan dengan GA, *particle swarm optimization* (PSO), dan lain-lain (Cheng & Prayogo, 2014). Dengan bertambah kompleksnya 1D-CSP, penelitian dengan menggunakan metode metaheuristik SOS (Cheng & Prayogo, 2014) untuk optimasi 1D-CSP dalam manajemen *waste* baja tulangan beton pada proyek beton bertulang sebaiknya tetap dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kinerja PSO dan SOS dalam menghasilkan *trim loss*.

2. LANDASAN TEORI

2.1 *Bar Bending Schedule*

Bar bending schedule merupakan sebuah metode perhitungan dalam merencanakan kebutuhan pembesian dalam proyek beton bertulang. Proses perhitungan ini meliputi daftar lengkap yang berisi lokasi struktur, pola penulangan, penjangkaran, rincian pembengkokkan, diameter baja tulangan beton, panjang, jumlah, serta berat jenis masing-masing.

2.2 Pembentukan *Cutting Pattern* untuk 1D-CSP

Cutting stock problem (CSP) merupakan salah satu dari tipe *cutting and packing problems* (C&P), terbagi menjadi beberapa karakteristik menyesuaikan dengan bentuk benda, dimensi benda, ketersediaan, dan permintaan (Dyckhoff, 1990).

Dalam 1D-CSP ketersediaan atau *supply* hanya memiliki satu panjang standard atau *standard length* (L_s) dengan kuantitas atau ketersediaan yang tidak terbatas (Benjaoran & Bhokha, 2014). Pada penelitian kali ini panjang standar dari baja tulangan beton ada 12 meter. Kemudian ada *demand length* atau kebutuhan panjang baja tulangan beton yang kita bisa dapatkan melalui data *bar bending schedule*. Dari *bar bending schedule* kita dapat membuat *demand list* yang kemudian kita selaraskan dengan *cutting plan*.

2.3 Formulasi Optimasi *Trim Loss*

Material yang digunakan pada sebuah proyek konstruksi sangatlah beragam. Perencanaan yang baik dalam pengelolaan material tersebut sangatlah penting agar tidak menimbulkan *waste* yang dapat menyebabkan pembengkakan biaya (*cost overrun*). Secara umum, proyek dengan beton bertulang sebagai struktur utama dapat menghasilkan *waste* (*trim loss*) yang cukup signifikan dari material baja tulangan beton (Elfahham, 2019).

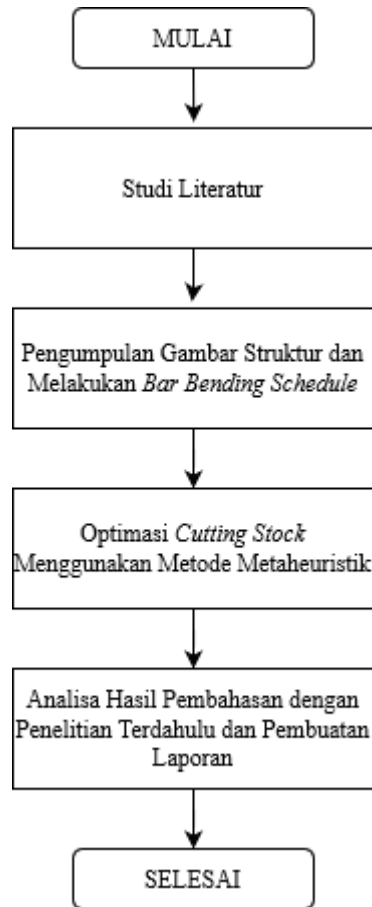
2.4 Metode Optimasi Metaheuristik dalam 1D- CSP

Metaheuristik pada dasarnya terdiri dari dua kata, yaitu “meta” dan “heuristik”. Kata “meta” berasal dari bahasa Yunani Kuno yang berarti metode tingkat tinggi, sedangkan kata “heuristik” berasal dari bahasa Yunani Kuno “*heuriskein*” yang berarti sebuah seni untuk menemukan strategi atau peraturan untuk menyelesaikan sebuah permasalahan (Talbi, 2009). Jadi, metode metaheuristik dapat diartikan sebagai metode lanjutan yang berbasis dari metode heuristik dalam menyelesaikan persoalan optimasi secara efektif dan efisien.

Metaheuristik dapat menjadi metode yang efisien untuk menggunakan *trial and error* untuk menghasilkan solusi dari persoalan yang kompleks dalam waktu yang cukup singkat (Gandomi et al., 2013). Tujuan dari metode metaheuristik ini adalah agar dapat mendapatkan hasil yang berkualitas baik dalam waktu yang dapat diterima dan bisa digunakan untuk berbagai jenis masalah atau persoalan, di mana tidak dapat dilakukan oleh kedua metode yang sudah disebutkan sebelumnya. Dalam 1D-CSP, optimasi metaheuristik akan sangat berperan pada bagian pemilihan pola pemotongan (*cutting pattern*). Memilih pola pemotongan yang efektif sangatlah memakan waktu dan tenaga karena itu pemrograman mulai dari IP, LP dan metaheuristik dikembangkan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur dari jurnal dan penelitian terdahulu untuk mengetahui teori mengenai *cutting stock problem* dan algoritma metaheuristik yang digunakan, yaitu SOS dan PSO. Setelah itu dilakukan pengumpulan data yang berupa gambar struktur beton bertulang pada proyek X. Gambar tersebut akan digunakan dalam pembuatan *bar bending schedule*. Informasi yang ada dalam *bar bending schedule* akan digunakan untuk melakukan pemodelan data sehingga dapat digunakan untuk *generate cutting pattern*, yang kemudian diselesaikan menggunakan optimasi algoritma metaheuristik. Setelah data dimodelkan, maka dilakukan optimasi menggunakan metode metaheuristik, yaitu PSO dan SOS. Lalu selanjutnya, dilakukan analisa untuk mengetahui mana yang memberikan hasil nilai *trim loss* yang paling kecil. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Kerangka Penelitian

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian Studi Kasus Proyek dengan 14 Variasi *Demand Length*

4.1.1. Proses Pembentukan *Cutting Pattern*

1. *Adapted CP Generator*

Melalui metode ini, dihasilkan *cutting pattern* sebanyak 51 macam dengan *range* besar *trim loss* setiap *cutting pattern* berkisar antara 0,01 meter hingga 0,95 meter. Rincian mengenai *cutting pattern* yang dihasilkan oleh *adapted CP generator* akan dijabarkan pada Tabel 1.

2. *Intensive Search Algorithm*

Pada *intensive search algorithm* parameter yang ditentukan ada tiga: *allowable trim loss* (T_w), *number of effective patterns* ($nEffPat$) dan *number of loops* ($nSLoop$). Untuk penelitian ini kita akan menggunakan T_w sebesar 0.10 meter, $nEffPat$ sebanyak 30 dan $nSLoop$ sebanyak 500. Angka-angka ini di dapat mengikuti *trial* pertama yang dilakukan oleh V. Benjaoran dan Bhokha (2013). Hasil dari algoritma pencarian ini adalah 30 *cutting pattern* dengan setiap *cutting pattern* akan memiliki L_i tidak kurang dari 11.90 meter ($T_w=0.10m$). Rincian mengenai *cutting pattern* yang dihasilkan oleh *intensive search algorithm* akan dijabarkan pada Tabel 2.

Tabel 1. *Cutting Pattern* Hasil dari *Adapted CP generator*

| <i>Cutting Pattern ke-i</i> | <i>A_j</i> | | | | | | | | | | | | | | <i>L_i</i> (m) |
|-----------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|
| | 7.30 | 5.36 | 4.36 | 3.56 | 3.01 | 2.81 | 2.53 | 2.11 | 1.91 | 1.71 | 1.43 | 1.41 | 1.05 | 1.01 | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.66 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.91 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11.74 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.82 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.94 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.52 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.12 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.77 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 11.59 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 11.53 |
| 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 11.50 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 11.34 |
| 13 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.77 |
| 14 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.73 |
| 15 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.73 |
| 16 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.53 |
| 17 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.25 |
| 18 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.88 |
| 19 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.68 |
| 20 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11.86 |
| 21 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.58 |
| 22 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.54 |
| 23 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.87 |
| 24 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.75 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.73 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.69 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.84 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.56 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.14 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.99 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.79 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 11.89 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 11.85 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 11.13 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 11.05 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.24 |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.83 |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.55 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.53 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.17 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11.13 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11.98 |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 11.96 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.60 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11.56 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.46 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.97 |
| 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 11.44 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 11.28 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 11.55 |
| 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11.11 |

Tabel 2. *Cutting Pattern* Hasil dari *Intensive Search Algorithm*

| Cutting Pattern ke- <i>i</i> | <i>A_j</i> | | | | | | | | | | | | | | <i>L_i</i> (m) |
|------------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|
| | 7.30 | 5.36 | 4.36 | 3.56 | 3.01 | 2.81 | 2.53 | 2.11 | 1.91 | 1.71 | 1.43 | 1.41 | 1.05 | 1.01 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.97 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.95 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 11.98 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.99 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 11.90 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 11.90 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.91 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 11.96 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 11.92 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1 | 1 | 11.93 |
| 11 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.00 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11.98 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11.95 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 11.99 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11.95 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 11.90 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.96 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 11.92 |
| 19 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 11.91 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 11.98 |
| 21 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.94 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.97 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 11.90 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.99 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11.97 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 11.90 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.97 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11.99 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 11.97 |
| 30 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 11.91 |

4.1.2. Hasil Optimasi dengan Kondisi *Oversupply*

Optimasi dengan kondisi *oversupply* akan dijalankan dengan menggunakan kedua *cutting pattern* dari masing – masing metode pembentukan *cutting pattern* yang berbeda. Untuk membandingkan kedua algoritma secara adil maka dilakukan ukuran populasi dan jumlah iterasi yang sama yaitu 200 untuk populasi dan iterasi sebesar 10.000. Setiap percobaan berlangsung selama kurang lebih dua jam. Setelah dilakukan optimasi, didapatkan hasil berupa *trim loss* dari masing-masing metode.

Pada Tabel 3 dengan *adapted CP generator* hasil *trim loss* terbaik didapatkan sepanjang 57.10 meter oleh metode SOS, sedangkan PSO mendapatkan hasil terbaik hanya 93.10 meter. Rata-rata kedua metode PSO mendapatkan 129,10 meter dan SOS mendapatkan 101,10 meter. Dari 30 kali percobaan, setiap percobaan pada didapatkan metode SOS menghasilkan standar deviasi lebih rendah daripada PSO yaitu hanya sebesar 20.50 meter sedangkan PSO 22,51 meter yang berarti SOS memiliki konsistensi lebih baik.

Pada Tabel 4, dengan metode *intensive search algorithm* mendapatkan hasil *trim loss* terbaik sebesar 45,10 meter pada metode SOS dan 45,10 meter pada metode PSO. Keduanya berhasil mendapatkan nilai terkecil dibandingkan dengan *adapted CP generator*. Nilai standar deviasi SOS pada metode pembentukan ini juga lebih baik yaitu 17,24 meter sedangkan PSO sebesar 30,89 meter.

Tabel 3 Hasil Optimasi *Trim Loss* dengan PSO dan SOS Menggunakan *Adapted CP Generator* dengan Kondisi *Oversupply*

| | PSO | SOS |
|----------------------------|--------|--------|
| Terbaik (m) | 93,10 | 57,10 |
| Terburuk (m) | 177,10 | 153,10 |
| Rata-Rata (m) | 129,10 | 101,10 |
| Standar Deviasi (m) | 22,51 | 20,50 |

Tabel 4. Hasil Optimasi *Trim Loss* dengan PSO dan SOS Menggunakan *Intensive Search Algorithm* dengan Kondisi *Oversupply*

| | PSO | SOS |
|----------------------------|--------|-------|
| Terbaik (m) | 45,10 | 45,10 |
| Terburuk (m) | 153,10 | 93,10 |
| Rata-Rata (m) | 103,10 | 72,30 |
| Standar Deviasi (m) | 30,89 | 17,24 |

4.1.3. Hasil Optimasi dengan Kondisi *Undersupply*

Pada kondisi *undersupply*, metode pembentukan *cutting pattern* yang digunakan adalah *intensive search algorithm* dikarenakan pada kondisi *oversupply* dapat dilihat hasil *intensive search algorithm* menghasilkan *trim loss* lebih baik dengan jumlah *cutting pattern* yang lebih sedikit. Untuk parameter PSO dan SOS, pada kondisi ini akan dilakukan dengan populasi sebesar 100 dan iterasi sebanyak 1000 untuk setiap proses optimasi dan program dijalankan sebanyak 30 kali. Setiap percobaan berlangsung sekitar tiga menit.

Tabel 5. Hasil Optimasi *Trim Loss* dengan PSO dan SOS Menggunakan *Intensive search algorithm* pada Kondisi *Undersupply*

| | PSO | SOS |
|----------------------------|-------|-------|
| Terbaik (m) | 9,10 | 9,10 |
| Terburuk (m) | 33,10 | 21,10 |
| Rata-Rata (m) | 12,39 | 12,39 |
| Standar Deviasi (m) | 6,39 | 5,41 |

Pada percobaan menggunakan metode *cutting pattern intensive search algorithm* dengan kondisi *undersupply*, PSO dan SOS berhasil mendapatkan *trim loss total* terbaik secara keseluruhan dengan hasil 9,10 meter. Namun SOS memiliki standar deviasi lebih rendah yaitu pada 5,41 meter sedangkan PSO pada 6,39 meter dan pada PSO hasil terburuk lebih besar daripada SOS yaitu 33,10 meter sedangkan SOS hanya 21,10 meter. Penjabaran dari hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 5.

4.1.4. Perbandingan Hasil Optimasi

Untuk lebih memastikan nilai dari hasil penelitian ini, dengan variabel A_j dan D_j yang sama, percobaan dilakukan pada *linear programming* dengan fungsi yang telah disediakan oleh MATLAB R2020. Hasil *trim loss* dari *linear programming* adalah 9,10 meter. Hasil ini sama dengan hasil terbaik PSO maupun SOS pada penelitian yang dilakukan dengan kondisi *undersupply*. Setelah itu dilakukan perbandingan antar metode optimasi dengan setiap kondisi serta masing-masing metode pembentukan *cutting pattern* yang dapat dilihat pada Tabel 6.

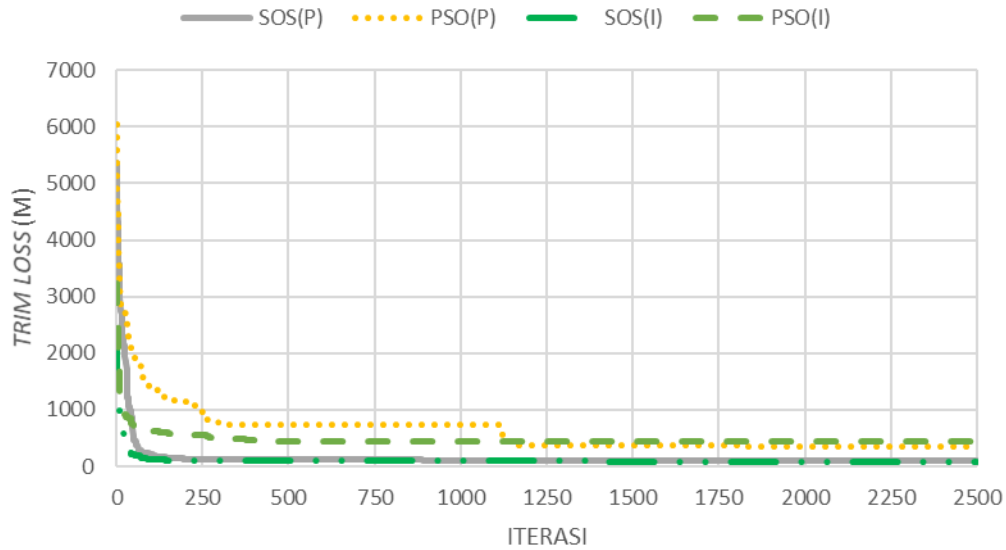
Tabel 6. Perbandingan Hasil Terbaik PSO dan SOS pada Kondisi *Oversupply* dan *Undersupply*

| | Oversupply | | | | Undersupply | | LP |
|------------------|-------------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|-----------|
| | ACPG | | ISA | | ISA | | |
| | PSO | SOS | PSO | SOS | PSO | SOS | |
| Min (m) | 93,10 | 57,10 | 45,10 | 45,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 |
| Max (m) | 177,10 | 153,10 | 153,10 | 93,10 | 33,10 | 21,10 | |
| Mean (m) | 129,10 | 101,10 | 103,10 | 72,30 | 12,39 | 12,39 | |
| Stdev (m) | 22,51 | 20,50 | 30,89 | 17,24 | 6,39 | 5,41 | |

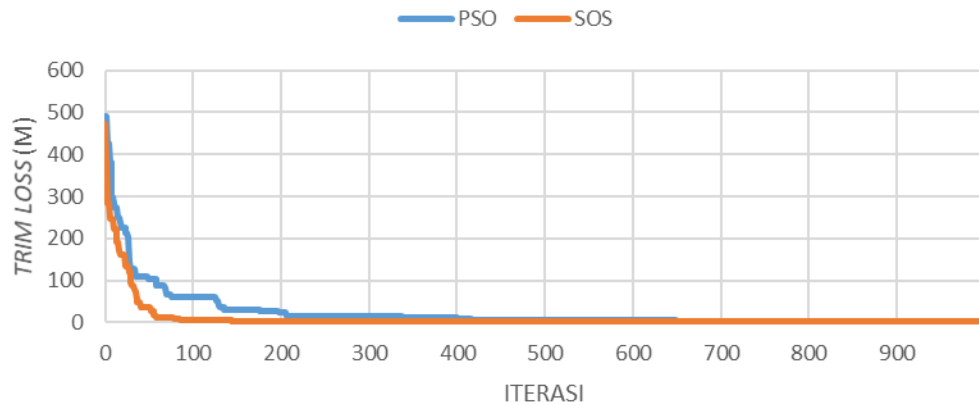
4.1.5. Grafik Konvergensi

Untuk mendapatkan gambar pergerakan dari setiap iterasi yang terjadi pada masing-masing metode dibutuhkan grafik konvergensi. Grafik konvergensi digambarkan menggunakan nilai median karena nilai ini merupakan nilai tengah di antara kinerja paling baik dan paling buruk. Karena itu, nilai median dianggap dapat mewakili kinerja dari metode PSO dan SOS dalam menemukan *trim loss* yang paling optimal dalam penelitian ini. Grafik konvergensi nilai median dari kondisi *oversupply* akan ditunjukkan pada Gambar 2.

Gozal: Optimasi *Trim Loss* Pembesian Beton Bertulang dengan Metode *Metaheuristik*



Gambar 2. Grafik Konvergensi Perbandingan Nilai Median Hasil dari Metode PSO dan SOS untuk Setiap *Cutting Pattern Generator* pada Kondisi *Oversupply*



Gambar 3. Grafik Konvergensi Perbandingan Nilai Median Hasil dari Metode PSO dan SOS dengan BFD pada Kondisi *Undersupply*

Dari grafik konvergensi pada Gambar 3. dapat dilihat bahwa SOS dapat menemukan hasil yang lebih optimal dalam waktu dan iterasi yang lebih cepat pada kondisi *undersupply*. Oleh karena itu SOS merupakan metode yang lebih baik dalam optimasi *trim loss* pada pemotongan baja tulangan beton.

4.2 Diskusi

Berdasarkan hasil penelitian, metode pembentukan *cutting pattern intensive search algorithm* dapat menghasilkan *trim loss* yang lebih kecil dibandingkan *adapted CP generator*. Selain itu, *intensive search algorithm* berhasil mendapatkan *trim loss* lebih baik dengan variasi *cutting pattern* lebih sedikit. Artinya *cutting pattern* yang dihasilkan oleh *intensive search algorithm* lebih efisien daripada *adapted CP generator*.

Pada aspek kondisi *oversupply* dan *undersupply*, penggunaan kondisi *undersupply* menunjukkan hasil yang lebih optimal. Kondisi *undersupply* dapat menemukan hasil yang lebih baik yaitu *trim loss* sebesar 9,1 meter di mana penggunaan kondisi *oversupply* tidak dapat meraih angka tersebut. Selain itu dari nilai terburuk, rata-rata dan standar deviasi, *undersupply* lebih unggul di mana angka-angka baik PSO dan SOS berhasil mendapatkan angka yang lebih baik daripada *oversupply*. Kondisi *undersupply* juga membutuhkan iterasi, jumlah populasi, serta *runtime* program yang lebih kecil sehingga lebih efektif dan efisien untuk mendapatkan *trim loss* yang lebih kecil.

Hasil *undersupply* memiliki rata-rata 87,88 persen lebih baik daripada *oversupply*. Hal ini dikarenakan ketika sebuah optimasi dengan *undersupply*, baik PSO maupun SOS akan dipaksa memilih *cutting pattern* yang ada untuk memenuhi seluruh *demand*. Sehingga varian panjang yang tidak dibutuhkan akan masuk ke dalam *cutting plan* dan menjadi *trim loss* karena sudah terpotong dan tidak digunakan, sedangkan pada kondisi *undersupply*, PSO dan SOS akan berusaha memenuhi seluruh kebutuhan tetapi tanpa melebihi *demand*, kemudian *undersupplied items* tidak dipaksa menggunakan *cutting pattern* yang tersedia melainkan diselesaikan dengan *best-fit decreasing*.

Dari kedua metode metaheuristik yang digunakan, SOS menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan PSO baik pada kondisi *oversupply* maupun *undersupply*. Walaupun keduanya berhasil menemukan hasil terbaik yang sama, ataupun rata-rata yang sama, namun PSO memiliki nilai terburuk yang lebih besar daripada SOS di kondisi *undersupply*, sedangkan pada kondisi *oversupply* SOS berhasil mendominasi keseluruhan hasil optimasi. Lalu pada grafik konvergensi, SOS menunjukkan dapat menemukan hasil optimasi lebih baik dalam waktu atau iterasi yang lebih rendah dibandingkan dengan PSO.

Jika dibandingkan dengan *linear programming*, hasil *trim loss* dari *linear programming* adalah 9,10 meter, sama dengan hasil terbaik PSO maupun SOS pada penelitian yang dilakukan dengan kondisi *undersupply*. Namun *linear programming* menggunakan 48 *cutting pattern* sedangkan pada optimasi metaheuristik hanya membutuhkan 30-34 *cutting pattern* untuk mendapatkan hasil tersebut. Selain itu, keuntungan menggunakan BFD, hasil *trim loss* pada batang baja tulangan beton terakhir memiliki panjang yang utuh (tidak terikat oleh *cutting pattern* manapun). Menurut Cherri et al. (2014) dengan panjang lebih daripada varian terkecil dari *demand length* sisa baja tulangan beton bisa digunakan lagi dan tidak dikategorikan sebagai *waste* melainkan sebagai *retail*. Oleh karena itu, hasil dengan penyelesaian dengan kondisi *undersupply* lebih menguntungkan.

Hasil terbaik pada penelitian kali ini adalah *trim loss* sebesar 9,10 meter, artinya *waste* pada pemotongan baja tulangan beton sebesar 0,62 persen. Penghematan yang terjadi dengan optimasi ini sebesar 144 meter atau 9,74 persen dibandingkan pembelian menggunakan asumsi *waste* 10 persen.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa metode metaheuristik berhasil menghasilkan *trim loss* yang minimum dari berbagai *cutting pattern* yang ada. Dari dua macam *cutting pattern generator* yang digunakan, *trim loss* terkecil dihasilkan oleh *intensive search algorithm*. Kondisi *undersupply* telah menghasilkan *trim loss* paling kecil dibandingkan dengan kondisi *oversupply* dengan *trim loss* sebesar 9,10 meter. Di antara kedua metode yang digunakan, yaitu PSO dan SOS, kinerja yang paling baik ditunjukkan oleh SOS karena dapat menghasilkan selain *trim loss* paling minimum dengan

iterasi atau waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan PSO. Penghematan yang dioptimasi pada penelitian ini sebesar 9,74 persen dari keseluruhan baja tulangan beton.

6. DAFTAR REFERENSI

- Benjaoran, V., & Bhokha, S. (2013). "Cutting Pattern Generation for Reinforcement Bars Using Intensive Search Algorithm." *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2013*.
- Benjaoran, V., & Bhokha, S. (2014). "Three-Step Solutions For Cutting Stock Problem of Construction Steel Bars". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1239-1247.
- Cheng, M.-Y., & Prayogo, D. (2014). "Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm". *Computers & Structures*, 139, 98-112.
- Cherri, A., Arenales, M., Yanasse, H., Poldi, K., & Vianna, A. (2014). "The One-Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers – A Survey". *European Journal of Operational Research*, 236, 395–402. doi: 10.1016/j.ejor.2013.11.026
- Dyckhoff, H. (1990). "A Typology of Cutting and Packing Problems". *European Journal of Operational Research*, 44(2), 145-159. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K)
- Elfahham, Y. (2019). "Estimation and Prediction of Construction Cost Index Using Neural Networks, Time Series, and Regression". *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 499-506. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.002>
- Gandomi, A. H., Yang, X.-S., Talatahari, S., & Alavi, A. H. (2013). "Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization". *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures* (pp. 1-24): Elsevier.
- Global ABC, I. d. U. (2019). "2019 Global Status for Buildings and Construction". *Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- Lee, D., Son, S., Kim, D., & Kim, S. (2020). "Special-Length-Priority Algorithm to Minimize Reinforcing Bar-Cutting Waste for Sustainable Construction". *Sustainability*, 12(15), 5950.
- Melhem, N., Maher, R., & Sundermeier, M. (2021). "Waste-Based Management of Steel Reinforcement Cutting in Construction Projects". *Journal of Construction Engineering and Management*, 147, 04021056. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0002052
- Prayogo, D., Gosno, R. A., Evander, R., & Limanto, S. (2018). "Implementasi Metode Metaheuristik Symbiotic Organisms Search dalam Penentuan Tata Letak Fasilitas Proyek Konstruksi Berdasarkan Jarak Tempuh Pekerja". *Jurnal Teknik Industri*, 19(2), 103-114.
- Ritz, G. J. (1994). *Total Construction Project Management*. McGraw-Hill.
- Salem, O., Shahin, A., & Khalifa, Y. (2007). "Minimizing Cutting Wastes of Reinforcement Steel Bars Using Genetic Algorithms and Integer Programming Models". *Journal Construction Engineering Management-ASCE*, 133. doi: 10.1061/(asce)0733-9364(2007)133:12(982)
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from Design to Implementation* (Vol. 74): John Wiley & Sons.