

# OPTIMASI DESAIN STRUKTUR RANGKA BATANG BERSKALA BESAR DENGAN METODE METAHEURISTIK

Reinard Eka Putra<sup>1</sup>, Jan Joseph<sup>2</sup>, Wong Foek Tjong<sup>3</sup>, dan Doddy Prayogo<sup>4</sup>

**ABSTRAK:** Studi ini menelusuri performa algoritma metaheuristik dalam mengoptimasi struktur rangka batang baja yang berskala besar. Algoritma yang digunakan dalam penelitian ini termasuk *particle swarm optimization* (PSO), *differential evolution* (DE), *teaching-learning-based optimization* (TLBO) dan *symbiotic organisms search* (SOS). Struktur yang akan dianalisa adalah rangka batang berbentuk kubah dengan 120 batang. Struktur tersebut diberi pembebanan dan batasan-batasan yang sesuai dengan yang diinginkan. Hasil optimasi dibandingkan dengan studi yang telah dilakukan sebelumnya untuk memastikan validitas program yang telah dibuat. Lalu struktur tersebut diberi batasan sesuai dengan peraturan Indonesia, SNI 1729:2015, dan dibandingkan dengan hasil optimasi dari program SAP2000 v18. Tersimpulkan bahwa hasil optimasi algoritma jauh lebih optimal apabila dibandingkan dengan optimasi dengan fitur SAP2000 v18. Hasil eksperimen yang didapat juga menunjukkan bahwa SOS adalah algoritma yang paling efisien dan bisa diandalkan dalam mengoptimasi struktur berskala besar. SOS meraih berat struktur minimum dengan standard deviasi terendah dan konvergensi tercepat untuk struktur berbentuk kubah ini.

**KATA KUNCI:** metaheuristik, optimasi, skala besar, rangka baja, SNI 1729:2015.

## 1. PENDAHULUAN

Optimasi struktur adalah proses memperkecil berat atau biaya struktur seminimal mungkin tanpa melampaui batasan-batasan yang ada dalam peraturan. Seiring dengan perkembangan zaman, kompleksitas dari struktur rangka batang akan selalu meningkat. Banyaknya variabel desain dan faktor pembatas membuat proses optimasi semakin susah untuk dilakukan dalam jangka waktu yang singkat. Lebih lanjut lagi, penggunaan suatu material tertentu dalam rangka batang memerlukan tambahan faktor pembatas yang harus memenuhi persyaratan dari sebuah peraturan desain, sebagai contoh SNI 1729:2015 untuk profil baja. Untuk menanggulangi masalah tersebut, para peneliti mulai mengembangkan berbagai macam algoritma metaheuristik sebagai salah satu metode alternatif untuk mengoptimasi struktur. Perkembangan metode optimasi menjadi suatu kebutuhan agar efisiensi bahan dan biaya dari struktur terjamin.

Seiring dengan meningkatnya penggunaan metode metaheuristik dalam optimasi struktur, pendekatan konvensional dengan cara matematis mulai ditinggalkan. Contoh algoritma metaheuristik yang sering dipakai adalah *particle swarm optimization* (PSO) (Eberhart and Kennedy, 1995) dan *differential evolution* (DE) (Storn and Price, 1997). Sedangkan contoh algoritma metaheuristik yang lebih modern: *teaching-learning-based optimization* (TLBO) (Rao *et al.*, 2011) dan *symbiotic organism search* (SOS) (Cheng and Prayogo, 2014).

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, reinardputra@gmail.com

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, jan.joseph96@gmail.com

<sup>3</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, wftjong@peter.petra.ac.id

<sup>4</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, prayogo@peter.petra.ac.id

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang optimasi telah dilakukan pada berbagai macam struktur, diantaranya struktur rangka baja dengan 10 batang, 15 batang atau 25 batang seperti yang ada dalam Kaveh *et al.* (2008), Kaveh and Talatahari (2009), Flager *et al.* (2014) dan Cheng *et al.* (2016). Namun, seiring dengan meningkatnya kompleksitas dan jumlah elemen pada suatu rangka batang, dibutuhkan metode optimasi yang lebih efisien. Hal ini menyebabkan diperlukannya penelitian lebih lanjut terhadap optimasi struktur rangka batang berskala besar yang pada umumnya memiliki jumlah elemen yang banyak. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Gunawan and Ali (2017), program SAP2000 v18 dapat menghasilkan struktur rangka batang yang lebih ringan dibandingkan algoritma metaheuristik untuk kasus rangka dengan jumlah batang yang sedikit. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan metode optimasi metaheuristik dalam menyelesaikan kasus rangka batang berskala besar.

## 2. LANDASAN TEORI

Metode heuristik adalah suatu metode yang menggunakan konsep pendekatan untuk menyelesaikan permasalahannya. Dilain pihak, kata “meta” pada metaheuristik dalam Bahasa Yunani diartikan sebagai tingkat lanjut. Sehingga, dapat diartikan bahwa metode metaheuristik merupakan metode lanjutan yang berbasis heuristik dalam menyelesaikan permasalahan optimasi secara efisien. Setiap algoritma mempunyai kelebihan dan kekurangannya sendiri sehingga penggunaan setiap algoritma disesuaikan untuk setiap kasus yang berbeda. Hal ini juga memungkinkan bahwa di masa depan akan banyak bermunculan algoritma baru yang unik dan mampu menyelesaikan permasalahan struktur yang kompleks tentunya.

### 2.1. *Particle Swarm Optimization (PSO)*

Algoritma PSO adalah algoritma yang diciptakan pertama kali oleh Eberhart dan Kennedy (Eberhart and Kennedy, 1995). Cara kerja PSO adalah dimulai dari menginisialisasi suatu populasi acak yang diberi nama partikel pada suatu area pencarian. Partikel ini pada mulanya akan menempati suatu lokasi secara acak yang disebut sebagai vektor koordinat di dalam ruang pencarian. Kemudian, setiap partikel akan diberi kecepatan  $v$  secara acak untuk bergerak dari satu lokasi ke lokasi lain yang pada akhirnya menuju ke suatu *goal* atau lokasi paling optimal.

### 2.2. *Differential Evolution (DE)*

Algoritma DE diciptakan oleh Storn dan Price pada tahun 1997 (Storn and Price, 1997). Dimulai dengan memperkenalkan beberapa organisme kepada suatu lingkungan dimana organisme tersebut dibiarkan untuk berevolusi dan bertanding dengan organisme lainnya. Tiga tahap yang dilakukan saat menggunakan DE adalah *mutation*, *crossover* dan *selection*. Tahap *mutation* adalah penciptaan organisme baru dari tiga organisme yang berbeda. *Crossover* adalah tahap untuk meningkatkan keanekaragaman organisme dengan memberi *trial vector*. Tahap *selection* mengecek apakah organisme yang baru lebih baik daripada sebelumnya.

### 2.3. *Teaching–Learning–Based Optimization (TLBO)*

Algoritma TLBO pertama kali diciptakan oleh Rao *et al.* (2011) dan merupakan algoritma yang terinspirasi dari proses belajar mengajar. *Teacher phase* adalah proses perhitungan yang dilakukan dengan melibatkan guru (*teacher*), yang bertindak sebagai panutan di antara para murid (*learner*). Pada fase ini para murid (*learner*) mempelajari guru, dalam kasus ini murid (*learner*) akan bergerak menuju guru (*teacher*) dengan posisi yang lebih baik. *Learner phase* merupakan proses dimana para murid (*learner*) akan belajar satu dengan yang lainnya melalui proses diskusi antar sesama murid (*learner*).

### 2.4. *Symbiotic Organisms Search (SOS)*

Algoritma SOS terinspirasi dari perilaku interaksi yang terlihat di antara organisme di ekosistem dan diciptakan oleh Cheng and Prayogo (2014). Organisme memiliki sifat dasar yaitu tidak dapat hidup

sendiri sehingga sangat memiliki ketergantungan pada spesies lain untuk mempertahankan keberlangsungan hidupnya. Hubungan berbasis ketergantungan ini dikenal sebagai simbiosis. Algoritma SOS menyimulasikan interaksi simbiosis antara sepasang organisme yang bertujuan untuk mencari organisme yang paling sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Interaksi antar makhluk hidup secara umum dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu mutualisme, komensalisme dan parasitisme. Meskipun algoritma SOS relative baru, telah banyak penelitian yang dilakukan untuk menguji performa dari algoritma tersebut. Beberapa dari penelitian tersebut termasuk Cheng *et al.* (2014), Cheng *et al.* (2015), Tran *et al.* (2016) dan Prayogo *et al.* (2017).

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dalam tiga tahap, yaitu analisa struktur dengan *direct stiffness method*, optimasi penampang dengan algoritma metaheuristik dan perbandingan hasil antara algoritma metaheuristik dan hasil optimasi dari SAP2000 v18. Tahap analisa struktur dan optimasi algoritma metaheuristik dilakukan dalam program MATLAB R2010a. Tahap optimasi akan menghasilkan luas penampang setiap batang dan berat total struktur yang dijadikan fungsi objektif (*objective function*). Lalu berpindah ke program SAP2000 v18, dimana struktur yang sama akan dianalisa dan dioptimasi menggunakan fitur dari program tersebut. Hasil dari setiap algoritma metaheuristik dan SAP2000 v18 ditabulasi dan dibandingkan satu sama lain.

### 4. HASIL DAN DISKUSI

Struktur yang ditinjau dalam studi ini berupa kubah dengan 120 batang. Rangka Batang dengan 120 batang ini pertama kali dioptimasi oleh Soh and Yang (1996) dalam bentuk optimasi bentuk. Lalu struktur ini digunakan sebagai kasus studi untuk optimasi berat oleh Kaveh and Mahdavi (2014). Dimana penelitian tersebut akan menjadi pembanding dengan hasil penelitian yang dilakukan. Geometri, perletakan beserta *grouping* elemen dari model spasial-120 dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Material struktur terbuat dari baja dengan berat jenis sebesar 0.288 lb/in<sup>3</sup> (7971.81 kg/m<sup>3</sup>), modulus elastisitas 30,450 ksi (210,000 MPa) dan tegangan leleh 58.0 ksi (400 MPa). Batasan *displacement* ditetapkan maksimum 5 mm pada seluruh arah. Tegangan tarik dan tekan yang diijinkan diambil dari peraturan AISC ASD (1989), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} \sigma_i^+ = 0.6F_y & \text{for } \sigma_i \geq 0 \\ \sigma_i^- & \text{for } \sigma_i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

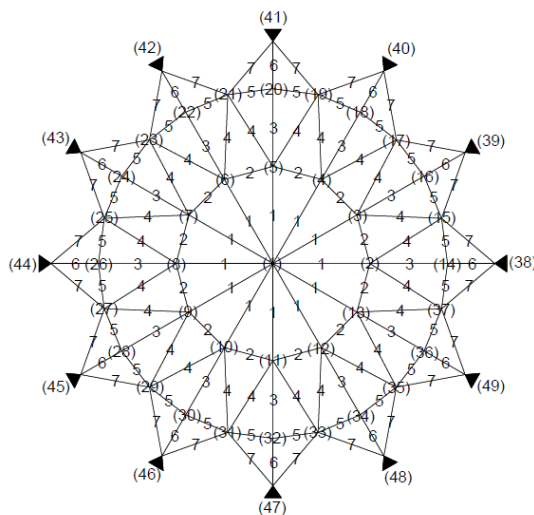
Dimana  $\sigma_i^-$  dihitung berdasarkan rasio kelangsingan elemen yang ditinjau:

$$\sigma_i^- = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{\lambda_i^2}{2C_c^2} \right) F_y \right] / \left( \frac{5}{3} + \frac{3\lambda_i}{8C_c} - \frac{\lambda_i^3}{8C_c^3} \right) & \text{for } \lambda_i < C_c \\ \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_i^2} & \text{for } \lambda_i \geq C_c \end{cases} \quad (2)$$

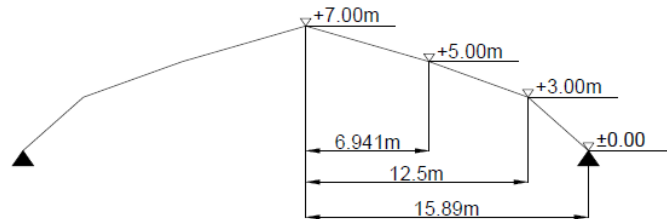
$$\lambda_i = \frac{KL_i}{r_i} \quad (3)$$

$$C_c = \sqrt{2\pi^2 E / F_y} \quad (4)$$

Perlu diketahui bahwa  $E$  adalah modulus elastisitas,  $F_y$  adalah tegangan leleh baja,  $K$  adalah faktor panjang tekuk,  $L_i$  adalah panjang batang,  $r_i$  adalah jari-jari girasi  $r_i = aA_i^b$ , dimana  $a = 0.4993$  and  $b = 0.6777$  ( $A$  harus dalam cm<sup>2</sup>) dan  $A_i$  adalah luas penampang.



Gambar 1. Tampak Atas Struktur Kubah dengan 120 Batang



Gambar 2. Tampak Samping Struktur Kubah dengan 120 Batang

Struktur kubah 120 batang ini kemudian diberi beban vertikal untuk seluruh node selain yang diberi perletakan. Pembebanannya adalah sebagai berikut:

- Node 1 : -13.490 kips (60 kN)
- Node 2 – 14 : -6.744 kips (30 kN)
- Node sisanya : -2.248 kips (10 kN)

Struktur ini tidak menggunakan *discrete variables*, sehingga luas penampang minimum adalah 0.775 in<sup>2</sup> (5 cm<sup>2</sup>) dan luas penampang maksimum adalah 20.0 in<sup>2</sup> (129.03 cm<sup>2</sup>). Kaveh and Mahdavi (2014) menggunakan metode *colliding bodies optimization* (CBO), dimana hasil optimasi yang didapatkan adalah 33286.3 lb (15098.41 kg). Perbandingan hasil optimasi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Optimasi Kubah-120 Batang

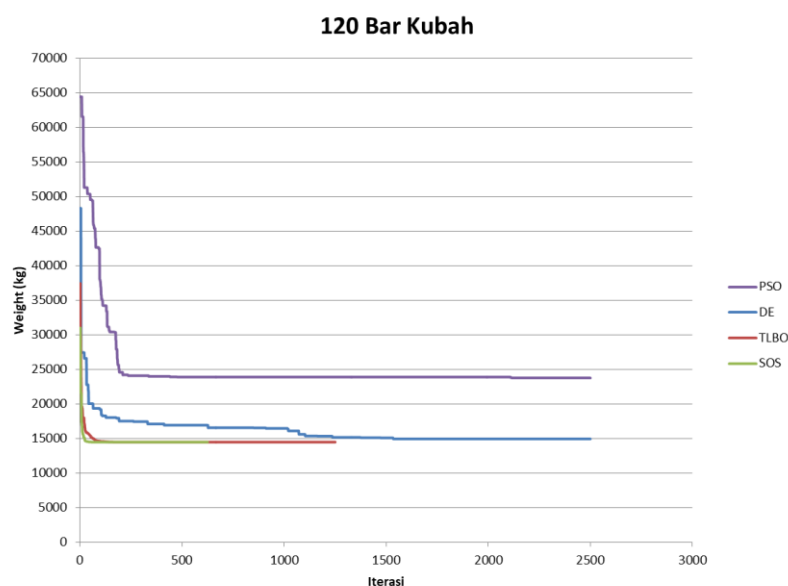
Variabel		CBO (Kaveh and Mahdavi, 2014)	PSO	DE	TLBO	SOS
A1	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	1953.09 (3.03)	1550.49 (2.40)	1724.56 (2.67)	1476.45 (2.29)	1476.30 (2.29)
A2	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	9788.63 (15.17)	12903.00 (20.00)	10954.57 (16.98)	10069.97 (15.61)	10075.74 (15.62)
A3	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	3376.90 (5.23)	12903.00 (20.00)	3338.46 (5.17)	3546.74 (5.50)	3553.69 (5.51)
A4	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	2012.25 (3.12)	1509.04 (2.34)	1693.62 (2.63)	1617.44 (2.51)	1616.91 (2.51)
A5	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	5228.25 (8.10)	3486.81 (5.40)	5762.72 (8.93)	5757.95 (8.92)	5756.97 (8.92)
A6	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	2204.25 (3.42)	12903.00 (20.00)	1897.92 (2.94)	2312.67 (3.58)	2294.21 (3.56)

A7	mm <sup>2</sup> (in <sup>2</sup> )	1607.61 (2.49)	1218.15 (1.89)	1439.58 (2.23)	1272.56 (1.97)	1275.71 (1.98)
Best	kg (lb)	15098.41 (33286.30)	23766.87 (52396.97)	14940.00 (32937.06)	14479.32 (31921.44)	14479.39 (31921.59)
Average	kg (lb)	15149.20 (33398.28)	42406.83 (95491.06)	22043.43 (48597.44)	14558.91 (32096.90)	14480.55 (31924.15)
Standard Deviasi	kg (lb)	30.43 (67.09)	8775.95 (19347.66)	13778.30 (30375.95)	213.53 (470.75)	1.52 (3.35)
CoV (%)		-	20.69	62.51	1.47	0.01
Jumlah Run yang Berhasil		-	30	15*	21*	30
No. FE		14960	50000	50000	50000	50000
Waktu (detik)		-	6928.82	6694.25	6781.44	6894.29

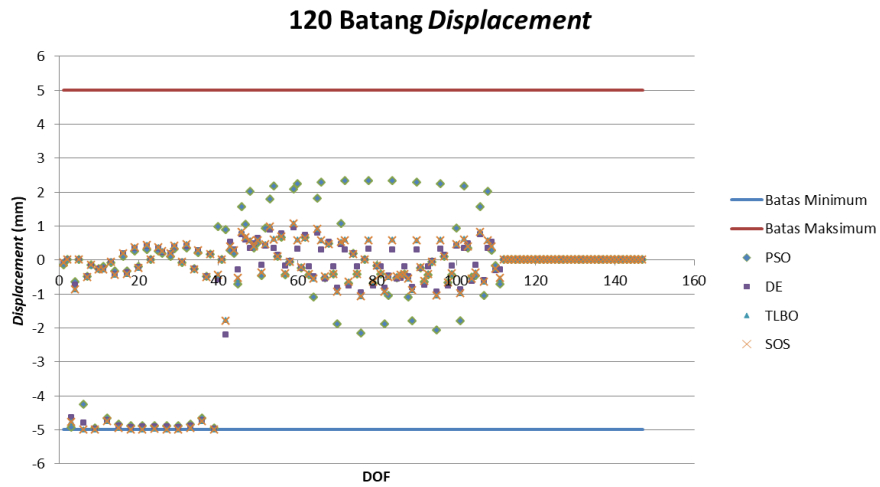
\* Metode optimasi ini hanya mampu menghasilkan kurang dari 30 hasil karena beberapa hasil melanggar batasan-batasan yang sudah ditentukan.

Terlihat dari **Tabel 1** bahwa algoritma TLBO mendapatkan berat struktur yang teringan yaitu 14479.32 kg. Apabila dibandingkan dengan hasil dari CBO, TLBO dapat memperoleh struktur yang 619.09 kg lebih ringan. Hal ini dapat dikarenakan sedikitnya jumlah *function evaluation* yang digunakan pada CBO dibandingkan dengan jumlah *function evaluation* pada TLBO. CBO hanya menggunakan 14960 *function evaluation* sedangkan TLBO menggunakan 50000 *function evaluation*. Sedangkan bila dibandingkan dengan hasil TLBO pada FE yang ke 14960, didapat berat sebesar 15450.45 kg. Apabila TLBO dibandingkan dengan SOS tentu lebih ringan TLBO namun dengan selisih hanya 0.07 kg. Dalam hal akurasi dan keseragaman, SOS lebih unggul dibandingkan TLBO. SOS berhasil mendapat hasil yang optimal tanpa melewati batasan-batasan yang telah ditentukan. Sedangkan TLBO mendapatkan hasil yang melanggar batasan sebanyak 9 dari 30 kali percobaan. Keseragaman SOS dapat divalidasi dengan kecilnya nilai standard deviasi yang telah dicapai. **Gambar 3** menunjukkan konvergensi dari keempat algoritma dan dapat dilihat bahwa SOS memiliki konvergensi yang tercepat.

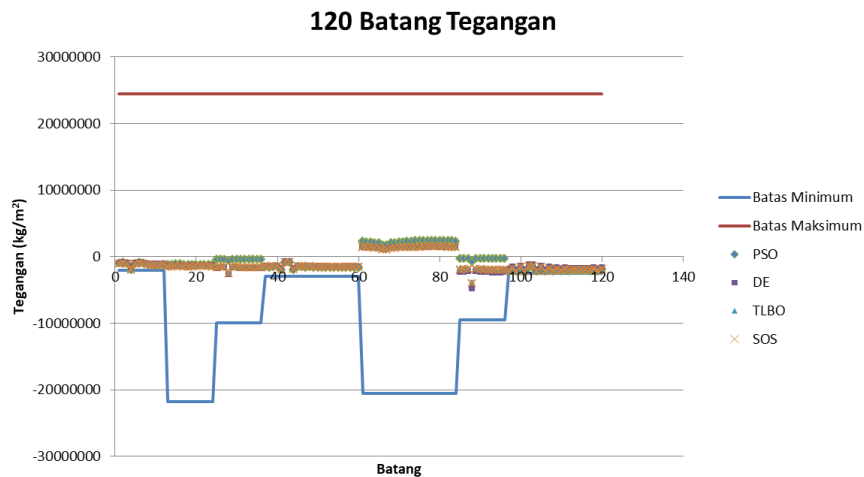
**Gambar 4** menunjukkan nilai *displacement* untuk setiap DOF yang ada dalam struktur. **Gambar 5** menunjukkan nilai tegangan yang terjadi pada setiap batang struktur. Kedua gambar tersebut dilengkapi dengan batasan yang diijinkan. Dapat dilihat bahwa *displacement* and tegangan keduanya mendekati yang diijinkan. Semakin dekat titik-titik menuju garis batas maka semakin efisien pula hasil optimasi yang didapat.



**Gambar 3. Perbandingan Konvergensi Kubah 120 Batang**



**Gambar 4. Displacement pada Setiap DOF 120 Batang**



**Gambar 5. Tegangan pada Setiap Elemen 120 Batang**

Agar disain dapat diterapkan sesuai dengan standar yang ada di Indonesia struktur tersebut diberi batasan tegangan sesuai dengan SNI 1729:2015. Batasan yang lain tidak diberlakukan agar hasil optimasi dari SAP2000 dapat dibandingkan dengan hasil optimasi yang dibuat dalam penelitian ini. Hasil perbandingan antara program algoritma dan SAP2000 v18 dapat dilihat pada **Tabel 2**. Penampang pada kasus ini menggunakan standar profil pipa bulat berongga dari AISC-ASD. SAP2000 v18 mendapatkan hasil optimasi berat struktur yang lebih berat sebesar 5261.17 kg bila dibandingkan dengan hasil optimasi dari DE, TLBO, SOS.

**Tabel 2. Hasil Optimasi Algoritma dan SAP 120 Batang Menurut SNI**

Variables		SAP2000	PSO	DE	TLBO	SOS
A1	mm2 (in2)	5419.34 (8.4)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)
A2	mm2 (in2)	1729.03 (2.68)	13741.91 (21.3)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)
A3	mm2 (in2)	2774.19 (4.3)	1729.03 (2.68)	1729.03 (2.68)	1729.03 (2.68)	1729.03 (2.68)
A4	mm2	1729.03	1438.71	1438.71	1438.71	1438.71

	(in2)	(2.68)	(2.23)	(2.23)	(2.23)	(2.23)
A5	mm2 (in2)	1438.71 (2.23)	13741.91 (21.3)	279.35 (0.433)	279.35 (0.433)	279.35 (0.433)
A6	mm2 (in2)	2045.16 (3.17)	13741.91 (21.3)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)	1438.71 (2.23)
A7	mm2 (in2)	1729.03 (2.68)	1096.77 (1.7)	1096.77 (1.7)	1096.77 (1.7)	1096.77 (1.7)
Best	kg (lb)	11507 (25368.56)	24207.25 (53367.78)	6245.83 (13769.69)	6245.83 (13769.69)	6245.83 (13769.69)
Average	kg (lb)	- -	41294.14 (91037.89)	24038.93 (52996.70)	6936.50 (15292.35)	6275.91 (13835.99)
Standard Deviasi	kg (lb)	- -	7478.42 (16487.08)	20789.58 (45833.13)	710.35 (1566.05)	70.42 (155.25)
CoV (%)		-	18.11	86.48	10.24	1.12
Jumlah Run yang Berhasil		-	30	8*	19*	30
No. FE		-	50000	50000	50000	50000
Waktu (detik)		-	6928.82	6694.25	6781.44	6894.29

\* Metode optimasi ini hanya mampu menghasilkan kurang dari 30 hasil karena beberapa hasil melanggar batasan-batasan yang sudah ditentukan.

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini dapat menyimpulkan beberapa hal mengenai algoritma metaheuristik dalam mengoptimasi rangka batang baja berskala besar. SOS merupakan algoritma metaheuristik yang paling dapat diandalkan karena menghasilkan berat struktur minimum dengan standard deviasi yang kecil. PSO tidak dapat menghasilkan berat struktur yang optimal dan hasil yang didapat sangat bervariasi. Performa DE juga tidak terlalu baik karena seringkali melebihi batasan yang diberlakukan. TLBO menunjukkan performa yang lebih baik daripada PSO dan DE namun tidak lebih baik dari SOS dalam hal keseragaman. Beberapa hasil TLBO masih melanggar batasan yang ada sedangkan hasil SOS selalu memenuhi batasan dan tidak banyak bervariasi. Fitur optimasi dari SAP2000 v18 dapat disimpulkan tidak efektif dalam mengoptimasi struktur berskala besar. Berat struktur yang dihasilkan hampir dua kali lebih berat daripada yang dihasilkan oleh algoritma metaheuristik.

## 6. DAFTAR REFERENSI

- Cheng, M.-Y., Chiu, C.-K., Chiu, Y.-F., Wu, Y.-W., Syu, Z.-L., Prayogo, D. and Lin, C.-H. (2014). "SOS Optimization Model for Bridge Life Cycle Risk Evaluation and Maintenance Strategies." *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*. Volume 26(4).
- Cheng, M.-Y. and Prayogo, D. (2014). "Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm." *Computers & Structures*. 139: 98-112.
- Cheng, M.-Y., Prayogo, D. and Tran, D.-H. (2015). "Optimizing Multiple-resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search." *Journal of Computing in Civil Engineering*. 30(3): 04015036.
- Cheng, M.-Y., Prayogo, D., Wu, Y.-W. and Lukito, M. M. (2016). "A Hybrid Harmony Search Algorithm for Discrete Sizing Optimization of Truss Structure." *Automation in Construction*. 69: 21-33.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). "A new optimizer using particle swarm theory." *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95*. Proceedings of the Sixth International Symposium on. Nagoya, Japan, 4-6 October 1995.
- Flager, F., Soremekun, G., Adya, A., Shea, K., Haymaker, J. and Fischer, M. (2014). "Fully Constrained Design: A General and Scalable Method for Discrete Member Sizing Optimization of Steel Truss Structures." *Computers & Structures*. 140: 55-65.
- Gunawan, R. and Ali, S. K. (2017). Optimasi Penampang Rangka Batang Dengan Metode *Metaheuristic* Berdasarkan SNI 1729:2015, Petra Christian University, Surabaya, Indonesia.
- Kaveh, A., Azar, B. F. and Talatahari, S. (2008). "Ant Colony Optimization for Design of Space Trusses." *International Journal of Space Structures*. 23(3): 167-181.
- Kaveh, A. and Mahdavi, V. (2014). "Colliding Bodies Optimization: A Novel Meta-heuristic Method." *Computers & Structures*. 139: 18-27.
- Kaveh, A. and Talatahari, S. (2009). "Size Optimization of Space Trusses Using Big Bang–Big Crunch Algorithm." *Computers & Structures*. 87(17): 1129-1140.
- Prayogo, D., Cheng, M.-Y. and Prayogo, H. (2017). "A Novel Implementation of Nature-inspired Optimization for Civil Engineering: A Comparative Study of Symbiotic Organisms Search." *Civil Engineering Dimension*. 19(1): 36-43.
- Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. P. (2011). "Teaching–Learning-based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems." *Computer-Aided Design*. 43(3): 303-315.
- Soh, C. K. and Yang, J. (1996). "Fuzzy Controlled Genetic Algorithm Search for Shape Optimization." *Journal of Computing in Civil Engineering*. 10(2): 143-150.
- Storn, R. and Price, K. (1997). "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces." *Journal of Global Optimization*. 11(4): 341-359.
- Tran, D.-H., Cheng, M.-Y. and Prayogo, D. (2016). "A novel Multiple Objective Symbiotic Organisms Search (MOSOS) for Time–Cost–Labor Utilization Tradeoff Problem." *Knowledge-Based Systems*. 94: 132-145.