

OPTIMASI UKURAN PENAMPANG DAN BENTUK STRUKTUR RANGKA BATANG BERBASIS RELIABILITAS DENGAN METODE METAHEURISTIK DAN LATIN HYPERCUBE SAMPLING

Gretel Gaby¹, Bobby Hartanto Wijaya², Wong Foek Tjong³ dan Doddy Prayogo⁴

ABSTRAK : Studi mengenai optimasi rangka batang telah banyak dilakukan sebelumnya karena dapat meningkatkan efisiensi dari struktur dan memberikan keuntungan maksimum. Salah satu topik yang didiskusikan belakangan ini adalah aspek reliabilitas pada struktur rangka batang dalam optimasi desain. Topik ini menjadi sangat penting terutama dalam optimasi ukuran penampang dan bentuk struktur rangka batang karena dapat meningkatkan angka keamanan dari struktur. Optimasi berbasis reliabilitas ini didefinisikan sebagai pencarian struktur yang optimal dan reliabel. Studi ini bertujuan untuk membandingkan performa dari dua algoritma metaheuristik yaitu *particle swarm optimization* (PSO) dan *symbiotic organisms search* (SOS) dalam melakukan optimasi struktur rangka batang dengan mengacu pada peraturan SNI 1729:2015. Penelitian ini akan menggabungkan metode *latin hypercube sampling* (LHS) dan algoritma metaheuristik. Metode LHS digunakan untuk memodelkan adanya ketidakpastian sedangkan kedua algoritma metaheuristik digunakan untuk menyelesaikan studi kasus *15-bar planar truss* dengan menggunakan profil struktur berongga (PSB) bulat. Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa performa algoritma SOS lebih baik jika dibandingkan dengan performa algoritma PSO.

KATA KUNCI: PSO, SOS, LHS, rangka batang, SNI 1729:2015

1. PENDAHULUAN

Pada dunia teknik sipil optimasi desain struktur sudah menjadi topik yang sangat penting dan menantang karena akan lebih menguntungkan jika dilakukan optimasi yang dapat meningkatkan efisiensi struktur. Optimasi struktur adalah suatu tindakan desain dan membangun struktur untuk menghasilkan keuntungan maksimum dengan sumber daya yang tersedia (Assimi et al., 2017). Oleh karena itu, banyak peneliti yang tertarik terhadap optimasi struktur dengan tujuan meminimalisasi biaya dan berat struktur dengan melakukan optimasi dari diameter pipa baja, ketebalan pelat, atau ukuran penampang baja (Gunawan & Papalambros, 2007).

Di samping itu, jika optimasi ukuran penampang dengan bentuk struktur rangka batang ini dilakukan dengan bentuk struktur yang optimal, maka pekerjaan desain akan memperoleh keuntungan yang maksimal (Wang et al., 2002). Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk melakukan optimasi ukuran penampang dan bentuk dari struktur rangka batang. Banyaknya jumlah elemen dan batasan desain yang digunakan dalam sebuah struktur mengakibatkan optimasi struktur lebih rumit untuk dilakukan. Oleh karena itu, metode metaheuristik menjadi lebih populer dalam menyelesaikan berbagai kasus optimasi struktur daripada metode gradien (Prayogo et al., 2018). *Particle swarm optimization* (PSO) sekarang sudah menjadi salah satu contoh algoritma metaheuristik yang populer digunakan untuk

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416086@john.petra.ac.id.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416110@john.petra.ac.id.

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

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, prayogo@petra.ac.id.

melakukan optimasi (Kennedy & Eberhart, 1995). Belakangan ini, *symbiotic organisms search* (SOS) juga banyak digunakan peneliti untuk melakukan kasus-kasus optimasi karena memiliki keuntungan yaitu tidak memerlukan pengaturan parameter algoritma secara spesifik dalam pengoperasiannya (Cheng & Prayogo, 2014).

Selain hal di atas, struktur rangka batang dalam penerapannya sangat sensitif terhadap beberapa variabel desain yang tidak menentu seperti luas penampang batang atau parameter yang tidak menentu seperti beban dan modulus elastisitas material (Ho-Huu et al., 2015). Menurut Ho-Huu et al. (2015), kekuatan dan keamanan struktur juga akan sangat dipengaruhi oleh perubahan pada variabel dan parameter tersebut sehingga ketidakpastian ini harus diperhitungkan. Atas dasar tersebut, optimasi berbasis reliabilitas menjadi sangat penting dalam desain struktur. Untuk menyelesaikan permasalahan optimasi struktur berbasis reliabilitas tersebut dibutuhkan metode untuk menganalisa probabilitas dan reliabilitas dari struktur tersebut. Dalam penelitian ini, reliabilitas struktur disimulasikan dengan menggunakan *latin hypercube sampling* (LHS) yang ditemukan oleh McKay (1992). Metode ini dipilih karena LHS sudah dapat konvergen dengan jumlah sampel yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *Simple Random Sampling* atau *Monte Carlo Sampling* (Matala, 2008) sehingga waktu simulasi akan menjadi lebih efisien.

Fungsi objektif dalam penelitian ini bersifat *single-objective* dimana hanya akan ada satu variabel saja yang akan dioptimasi yaitu massa total dari struktur. Untuk memodelkan ketidakpastian variabel, penelitian ini menetapkan variabel acak dengan rata-rata dan standar deviasi tertentu yang akan disimulasikan menggunakan metode LHS. Agar dapat mencapai massa struktur terkecil yang reliabel, penelitian ini akan menggunakan algoritma metaheuristik yaitu PSO dan SOS lalu membandingkan keamanan, dan batasan-batasan yang harus diambil dalam melakukan proses optimasi kinerja dari kedua algoritma metaheuristik tersebut. Selain itu, penelitian ini menggunakan peraturan SNI 1729:2015 “Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural” untuk menentukan perhitungan untuk menentukan perhitungan kekuatan, angka keamanan, dan batasan-batasan yang harus diambil dalam melakukan proses optimasi.

2. LANDASAN TEORI

Heuristik berasal dari kata Yunani *heuriskein* yang berarti seni untuk menemukan strategi dalam menyelesaikan persoalan sedangkan *meta* berarti metodologi tingkat tinggi atau lanjut (Talbi, 2009). Oleh karena itu, Talbi (2009) mendefinisikan metaheuristik sebagai metode lanjut berbasis heuristik untuk menyelesaikan persoalan optimisasi secara efisien. Kemampuan suatu algoritma metaheuristik untuk dapat melakukan eksplorasi dan eksploitasi secara seimbang akan menentukan nilai efisiensi dari algoritma tersebut; eksploitasi bertujuan untuk mengidentifikasi solusi yang terbaik sedangkan eksplorasi bertujuan agar algoritma dapat melakukan pengacakan pada ruang pencarian secara efisien (Cheng et al., 2016).

2.1 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO pertama diperkenalkan pada tahun 1995 oleh Kennedy dan Eberhart (1995). Algoritma PSO sendiri digambarkan seperti simulasi dari interaksi sosial antara organisme seperti kawanan burung ataupun ikan di laut. Ketika kawanan burung sedang mencari makan, mereka akan mencari tempat yang terbaik. Untuk menemukan tempat tersebut setiap burung mempunyai kecepatan yang tergantung dari tempat terbaik menurut dirinya sendiri, kelompoknya, dan tempat sebelumnya (Ren & Bai, 2010). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menemukan solusi dari optimasi ini:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + r_1c_1(X_{pbest}(t) - X_i(t)) + r_2c_2(X_{gbest}(t) - X_i(t)), \quad (1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + v_i(t+1), \quad (2)$$

dimana v_i adalah kecepatan partikel i , w adalah berat partikel, c_1 dan c_2 adalah konstanta yang telah ditentukan sebelumnya, X_{pbest} adalah posisi *personal best*, x_i adalah posisi partikel saat ini, X_{gbest} adalah posisi *global best*, dan r_1 dan r_2 adalah angka acak antara nol sampai satu.

2.2 Symbiotic Organisms Search (SOS)

SOS merupakan salah satu algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari interaksi antara organisme dalam suatu ekosistem (Cheng & Prayogo, 2014). Metode ini sesuai dengan sifat dasar dari suatu makhluk hidup yang tidak dapat hidup sendiri dan membutuhkan interaksi antara satu sama lain. Interaksi antar makhluk hidup ini yang disebut dengan simbiosis. SOS mengambil tiga bentuk interaksi atau simbiosis yaitu simbiosis mutualisme, simbiosis komensalisme, dan simbiosis parasitisme. Dalam simbiosis mutualisme, dua organisme acak dipilih untuk berinteraksi secara mutualisme yang diharapkan dapat meningkatkan nilai kedua *fitness value* 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 *fitness value* yang lebih baik dibandingkan *fitness value* dari organisme tersebut. SOS juga telah digunakan untuk menyelesaikan banyak kasus, salah satunya pada penelitian yang dilakukan oleh Tejani et al. (2018). Model matematis dari algoritma SOS ini dapat dilihat pada penelitian yang dilakukan oleh Cheng & Prayogo (2014).

2.3 Kapasitas Tarik dan Tekan berdasarkan SNI 1729:2015

Profil Struktur Berongga (PSB) bulat dengan mutu BJ37 yang diambil dari (Gunawan, 1988) digunakan sebagai desain variabel pada studi ini. Perhitungan kapasitas yang digunakan pada penelitian ini yaitu kapasitas tarik (BAB D) dan kapasitas tekan (BAB E) pada SNI 1729:2015.

2.4 Latin Hypercube Sampling (LHS)

Metode LHS digunakan untuk memastikan adanya estimasi yang merata dari *statistical moments of response function* (Viana et al., 2010). Pada metode ini sampel akan terbagi merata ketika diproyeksikan ke dalam suatu rentang oleh beberapa sumbu koordinat. Probabilitas kumulatif dari sampel dapat ditulis seperti:

$$Probi = \left(\frac{1}{N}\right)r_u + \frac{(i-1)}{N} \quad (3)$$

dimana r_u adalah angka acak yang terdistribusi secara merata dari nol sampai satu. Setelah itu, probabilitas kegagalan dapat diperoleh dari:

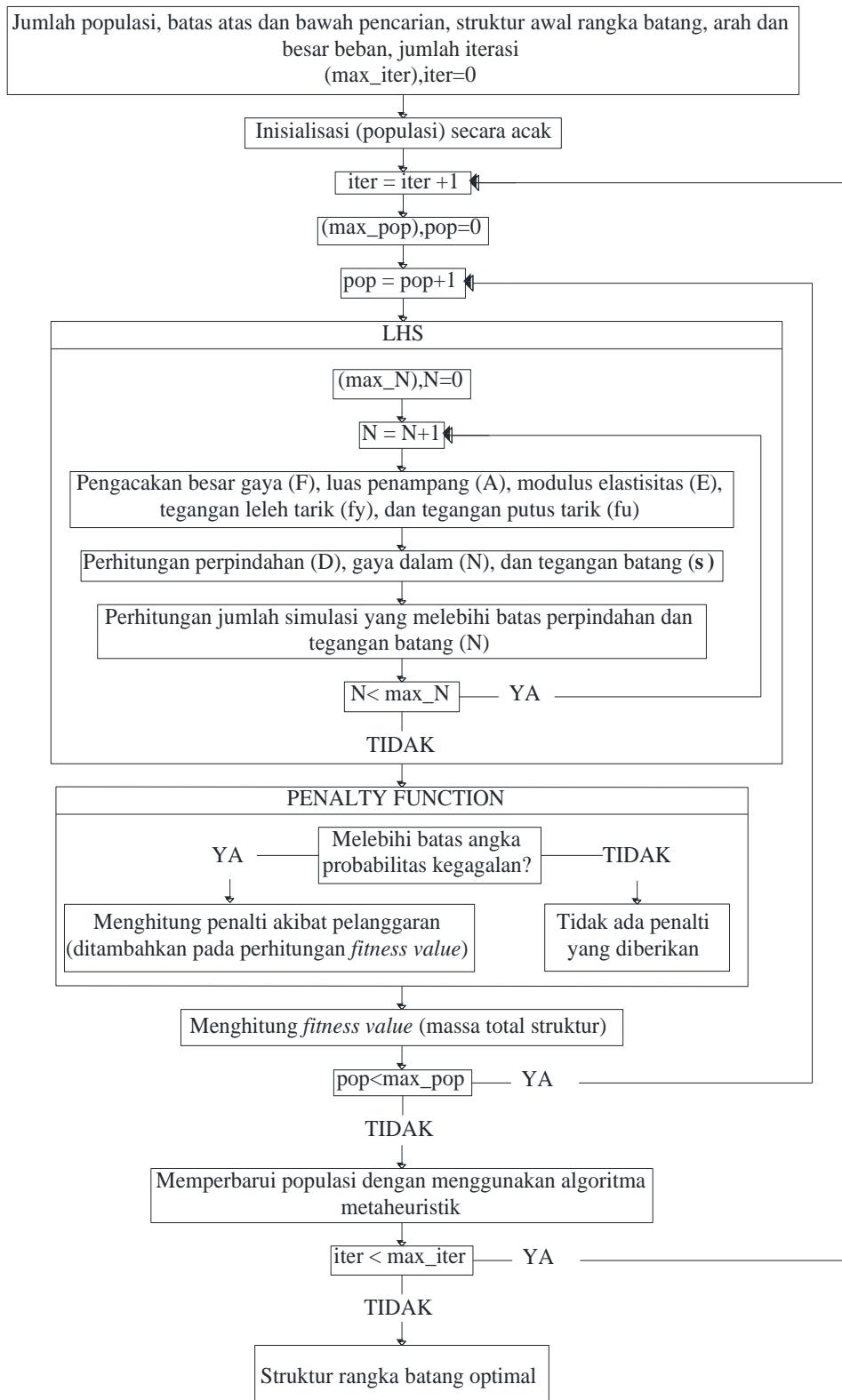
$$Pf \cong \frac{N_H}{N} \quad (4)$$

dimana N_H adalah jumlah simulasi yang gagal dan N adalah total jumlah simulasi.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Secara umum, konsep pengerjaan optimasi ukuran penampang dan bentuk rangka batang adalah dengan melalui proses iterasi memperbesar atau memperkecil ukuran penampang rangka batang dan pergerakan *nodes* pada *ground structure* seperti terlihat pada **Gambar 1**. *Ground structure* merupakan bentuk dasar dari struktur rangka batang yang akan dioptimasi.

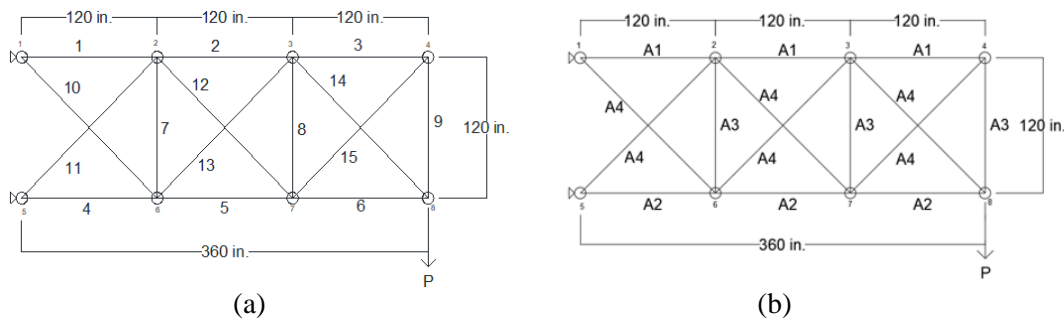
Untuk dapat membandingkan performa dari kedua algoritma yaitu PSO dan SOS, digunakan satu buah studi kasus, *15-bar truss* dengan PSB Bulat, yang pertama kali diusulkan oleh Miguel et al. (2013). Pada studi kasus ini terdapat dua buah *constraints*, yaitu *constraints* kekuatan tarik dan tekan batang berdasarkan peraturan SNI 1729:2015 dan probabilitas keberhasilan (reliabilitas) struktur yang harus lebih dari 99,865%. Masing-masing algoritma dijalankan sebanyak 30 *runs*. Dimana 1 *run* terdiri dari 15000 *function evaluationos* odan 1000 simulasi untuk setiap *function evaluations* untuk mengetahui konsistensi hasil optimasi dan reliabilitas struktur dari masing-masing algoritma.



Gambar 1. Diagram Alir Optimasi Ukuran Penampang dan Bentuk Struktur Rangka Batang

4. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 2 menampilkan *Ground structure* dari *15-bar truss* yang dikelompokkan menjadi 4 kelompok / *groups*. Parameter yang digunakan pada kedua studi kasus dapat dilihat pada **Tabel 1** di bawah. Luas penampang diambil secara diskrit dari tabel profil baja (Gunawan, 1988). Pada penelitian ini, proses optimasi untuk ukuran penampang dilakukan berdasarkan pengelompokan yang dapat dilihat pada **Gambar 2**. Perpindahan *node* pada penelitian ini dibatasi dengan $100 \text{ in} \leq x_6 \leq 140 \text{ in}$ (Miguel et al., 2013), $220 \text{ in} \leq x_7 \leq 260 \text{ in}$ (Miguel et al., 2013), $0 \text{ in} \leq y_6 < 120 \text{ in}$, $0 \text{ in} \leq y_7 < 120 \text{ in}$, $0 \text{ in} \leq y_8 < 120 \text{ in}$, $x_2 = x_6$, $x_3 = x_7$, $y_5 < y_6 < y_7 < y_8$. Batasan perpindahan *nodes* yang lain tidak mengikuti Miguel et al. (2013) karena pada penelitian ini juga memerhatikan unsur estetika dari rangka batang. Selain itu perpindahan *node* ini dilakukan setiap 5 *in* dan tidak dilakukan secara *continuous*. Dari **Gambar 2** juga dapat dilihat bahwa *nodes* 1 dan 5 merupakan lokasi perletakkan sedangkan *node* 8 merupakan lokasi beban.



Gambar 2. *Ground Structure* dari Studi Kasus *15-Bar Truss* (a) dan Pengelompokan Ukuran Penampang *15-Bar Truss* (b)

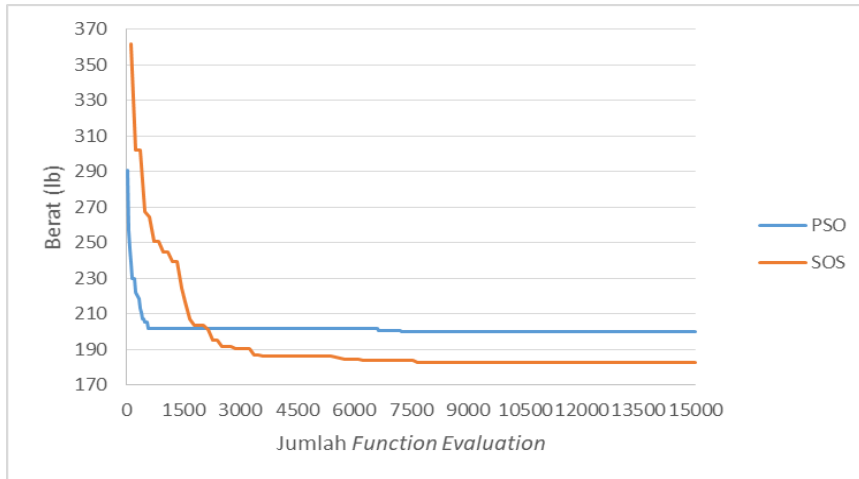
Tabel 1. Parameter yang Digunakan pada Studi Kasus

Variabel	Nilai	Distribusi	Rata-rata	Dispersi
Modulus elastisitas (E)	-	Normal (Blum, 2013)	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$	$\pm 6\%$ (Blum, 2013)
Tegangan leleh tarik (f_y)	240 MPa	Normal (Blum, 2013)	287,08 MPa	$\pm 10\%$ (Blum, 2013)
Tegangan putus tarik (f_u)	370 MPa	Normal (Blum, 2013)	442,58 MPa	$\pm 10\%$ (Blum, 2013)
Beban	-	Normal (Blum, 2013)	$1,05 \times 10^4 \text{ lb}$	$\pm 10\%$ (Blum, 2013)
Berat jenis	0.1 lb/in.^3	-	-	-

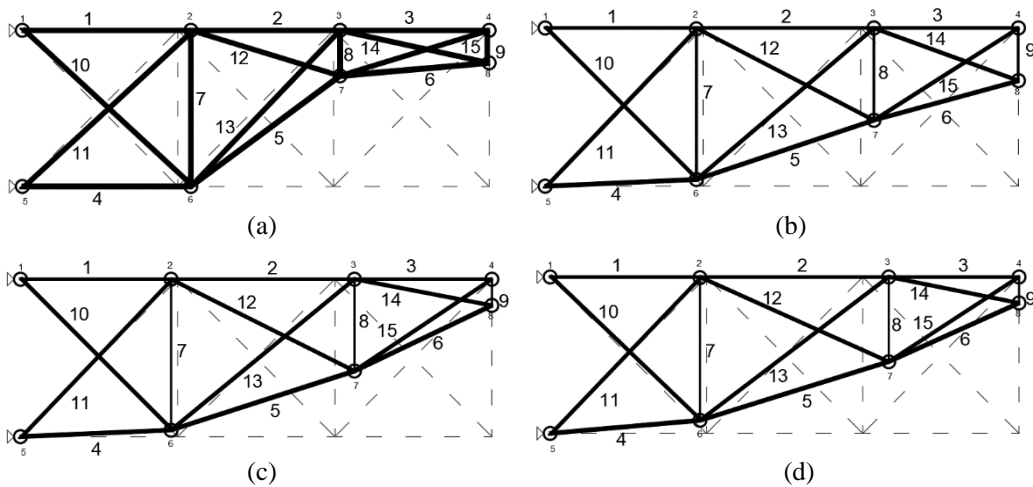
Tabel 2 menunjukkan hasil optimasi dari studi kasus *15-bar truss* dengan PSB bulat dengan algoritma PSO dan SOS. Algoritma SOS dapat memperoleh hasil massa teringan pada studi kasus ini yaitu sebesar 172,39 *lb*. Dalam segi massa terburuk, rata-rata, standar deviasi, dan median SOS juga mampu memperoleh hasil terbaik jika dibandingkan dengan algoritma PSO. PSO tidak dapat memperoleh hasil optimasi yang stabil dikarenakan nilai standar deviasi yang tinggi.

Tabel 2. Hasil dari Studi Kasus 15-Bar Truss

Variabel		PSO	SOS
A ₁ – A ₃	mm ²	646,54	576,04
A ₄ – A ₆	mm ²	1226,48	989,22
A ₇ – A ₉	mm ²	229,05	123,78
A ₁₀ – A ₁₅	mm ²	646,54	646,54
X ₂	mm ²	105	115
X ₃	mm ²	240	260
Y ₆	mm ²	25	10
Y ₇	mm ²	65	55
Y ₈	mm ²	90	100
Terbaik	mm ²	185,23	172,39
Terburuk	mm ²	219,11	192,01
Rata-rata	mm ²	198,68	183,75
Median	mm ²	200,00	182,62
Standar deviasi	mm ²	7,84	6,27
FE	mm ²	15000	15000



Gambar 3. Grafik Konvergensi Kasus 15-Bar Truss



Gambar 4. Proses Iterasi 15-Bar Truss Menggunakan Algoritma SOS: (a) Iterasi ke-1; (b) Iterasi ke-25; (c) Iterasi ke-50; (d) Iterasi ke-125

Gambar 3 menunjukkan grafik konvergensi dari masing-masing algoritma diambil dari hasil *run* median dari ke-30 *run* tersebut. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa SOS pada *run* median mampu menghasilkan massa yang paling optimal jika dibandingkan dengan algoritma PSO. **Gambar 4** memaparkan proses iterasi dari *ground structure* mula-mula menjadi hasil optimasi akhir pada 15000 *function evaluations* untuk masing-masing algoritma.

5. REKAPITULASI

Tabel 3 menunjukkan peringkat dari masing-masing algoritma untuk kelima kriteria yang ditinjau. Angka 1 menunjukkan peringkat dengan performa terbaik diantara peringkat lainnya. Sebaliknya angka 4 menunjukkan peringkat dengan performa terburuk diantara peringkat lainnya.

Tabel 3. Rekapitulasi Peringkat Algoritma

Kriteria	PSO	SOS
Terbaik	2	1
Terburuk	2	1
Rata-rata	2	1
Standar deviasi	2	1
Median	2	1

6. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, peneliti telah membandingkan performa optimasi dari dua buah algoritma metaheuristik yaitu PSO dan SOS dengan meninjau satu buah studi kasus *15-bar truss* dengan PSB bulat. Algoritma SOS memiliki performa terbaik dibandingkan dengan PSO dalam kemampuannya menemukan massa teroptimal dan konsistensi yang diukur melalui lima kriteria massa. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode simulasi yang lebih *advanced* agar dapat dilakukan penelitian yang lebih efisien.

7. DAFTAR REFERENSI

- Assimi, H., Jamali, A., & Nariman-zadeh, N. (2017). "Sizing and Topology Optimization of Truss Structures Using Genetic Programming." *Swarm and Evolutionary Computation*, 37, 90-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009>
- Blum, H. B. (2013). *Reliability-Based Design of Truss Structures by Advanced Analysis*. Sydney, Australia.
- Cheng, M.-Y., & Prayogo, D. (2014). "Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm." *Computers & Structures*, 139, 98-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>
- Cheng, M. Y., Prayogo, D., Wu, Y. W., & Lukito, M. M. (2016). "A Hybrid Harmony Search Algorithm for Discrete Sizing Optimization of Truss Structure." *Automation in Construction*, 69, 21-33.
- Gunawan, R. (1988). *Tabel Profil Konstruksi Baja*. Vol. 7: Kanisius.
- Gunawan, S., & Papalambros, P. Y. (2007). "Reliability Optimization with Mixed Continuous-Discrete Random Variables and Parameters." *Journal of Mechanical Design*, 129(2), 158-165.
- Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T., Nguyen-Thoi, M. H., & Le-Anh, L. (2015). "An Improved Constrained Differential Evolution Using Discrete Variables (D-ICDE) for Layout Optimization of Truss Structures." *Expert Systems with Applications*, 42(20), 7057-7069.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, 27 Nov.-1 Dec. 1995). *Particle Swarm Optimization*. Paper presented at the Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.

- Matala, A. (2008). "Sample Size Requirement for Monte Carlo Simulations Using Latin Hypercube Sampling." *Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Systems Analysis Laboratory*.
- McKay, M. D. (1992). *Latin Hypercube Sampling as A Tool in Uncertainty Analysis of Computer Models* (No. LA-UR-92-2338; CONF-921219-1). Los Alamos National Lab., NM (United States).
- Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., & Miguel, L. F. F. (2013). "Multimodal Size, Shape, and Topology Optimisation of Truss Structures Using the Firefly Algorithm." *Advances in Engineering Software*, 56, 23-37.
- Prayogo, D., Wong, F. T., & Sugianto, S. (2017, October). "Enhanced Symbiotic Organisms Search (ESOS) for Global Numerical Optimization." In *2017 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, 69-73. IEEE.
- Ren, Y., & Bai, G. (2010). "Determination of Optimal SVM Parameters by Using GA/PSO." *JCP*, 5(8), 1160-1168.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from Design to Implementation*. Vol. 74. John Wiley & Sons.
- Tejani, G. G., Pholdee, N., Bureerat, S., & Prayogo, D. (2018). "Multiobjective Adaptive Symbiotic Organisms Search for Truss Optimization Problems." *Knowledge-Based Systems*, 161, 398-414.
- Viana, F. A., Venter, G., & Balabanov, V. (2010). "An Algorithm for Fast Optimal Latin hypercube Design of Experiments." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 82(2), 135-156.
- Wang, K., Kelly, D., & Dutton, S. (2002). "Multi-Objective Optimisation of Composite Aerospace Structures." *Composite Structures*, 57(1-4), 141-148.