

OPTIMASI STRUKTUR RANGKA BATANG 3 DIMENSI BERBASIS RELIABILITAS DENGAN MENGGUNAKAN METODE METAHEURISTIK DAN LATIN HYPERCUBE SAMPLING

Dion Nathanael Widjajanto¹, Rivaldi Giantara², dan Doddy Prayogo³

ABSTRAK : Peningkatan kinerja struktur bangunan adalah tujuan utamanya sehingga dibutuhkan perbaikan dengan mempertimbangkan biaya yang murah dan aman. Perbaikan ini dapat dioptimalkan dengan metode optimasi. Metode ini sangat berguna untuk mendapatkan struktur dengan hasil yang lebih efisien. Untuk mencari solusi yang optimal, permodelan struktur dapat disimulasikan secara sempurna. Tetapi pada kenyataannya, struktur selalu memiliki penyimpangan karena adanya ketidakpastian dan kecacakan yang terjadi di lapangan. Faktor kecacakan ini diperhitungkan dengan menggunakan metode *Reliability-Based Design Optimization* (RBDO) sehingga faktor reliabilitas suatu struktur diperhitungkan. Metode ini juga mensimulasikan sejumlah sampel acak dengan memperhitungkan 'Safety Factor'. Simulasi sampel acak ini menggunakan metode *Latin Hypercube Sampling* (LHS). Fungsi objektif dari algoritma metaheuristik adalah untuk meminimalkan massa total struktur rangka batang baja terhadap *constraints* statis dan dinamis serta *random variables* yang dipakai seperti *load* (P), tegangan leleh material (σ_y) dari penampang rangka batang dengan memperhitungkan *Probability of Success* 99.8653%. Diuji berdasarkan studi kasus *25-bar-truss* dan spesifikasi bangunan baja struktural Indonesia, SNI 1729:2015.

Algoritma yang digunakan pada studi ini adalah: *Particle Swarm Optimization* dan *Symbiotic Organisms Search*. Algoritma-algoritma tersebut diuji pada studi kasus *25-bar truss* serta pada batasan sesuai SNI 1729:2015. Performa dari algoritma tersebut diukur dari lima kriteria massa dan satu kriteria *run time*. Lima kriteria massa yang digunakan adalah massa terbaik, terburuk, rata-rata, standar deviasi, dan median dari struktur rangka batang baja. Hasil penelitian menunjukkan SOS memiliki performa lebih baik pada studi kasus *25-bar truss* dan pada batasan sesuai SNI.

KATA KUNCI: optimasi, kecacakan, metaheuristik, SNI 1729:2015

1. PENDAHULUAN

Biaya, mutu dan keselamatan adalah hal yang penting di dunia konstruksi teknik sipil dikarenakan sifat dasar manusia yang lebih memilih struktur yang murah dan aman (Mathakari *et al.*, 2007). Untuk mendapatkan hasil desain yang optimal maka perlu menggunakan metode optimasi. Optimal sendiri dapat berarti ada solusi yang lebih baik dibandingkan solusi yang sudah ada.

Untuk mencari solusi yang optimal atau *gbest* merupakan hal yang kompleks. Meskipun dalam perhitungannya, permodelan struktur dapat disimulasikan secara sempurna. Tetapi pada kenyataannya, struktur selalu memiliki ketidaksempurnaan atau penyimpangan dari keadaan yang telah ditentukan oleh permodelannya. Solusi optimal yang diperoleh dari perhitungan tidak pernah tercapai secara absolut dan terdapat ketidakpastian dan kecacakan yang terjadi di lapangan. Serta kemampuan optimalnya mungkin bisa berkurang karena beberapa ketidakpastian yang tidak bisa dihindari. Sebagai contoh mutu baja, beban yang terjadi dan sebagainya. Untuk menjelaskan ketidakpastian dan kecacakan beberapa parameter yang mempengaruhi kekuatan struktur, beberapa formulasi untuk optimasi dikembangkan dengan menggunakan analisis stokastik (Lagaros *et al.*, 2007).

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416066@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416138@john.petra.ac.id

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

Dari kerumitan dalam optimasi struktur yang diakibatkan oleh banyaknya jumlah elemen dan batasan desain yang digunakan menyebabkan metode metaheuristik lebih populer digunakan daripada metode berbasis gradien. Dengan menggunakan *reliability-based design optimization* (RBDO) untuk melakukan optimasi suatu struktur yang ada, khususnya pada rangka batang. RBDO berfungsi untuk merancang keamanan jika terjadi kejadian yang ekstrim. Jika dibandingkan dengan metode optimasi tradisional yang meliputi algoritma kalkulus, *enumerative or hill-climbing algorithms*, optimasi tersebut hanya dapat bekerja menemukan solusi optimal tunggal secara lokal dan oleh karena itu tidak efektif dalam pencarian multi-modal sehingga untuk khusus rangka batang lebih baik dianalisa dengan menggunakan RBDO (Lagaros *et al.*, 2007). Keuntungan utama RBDO sehubungan dengan proses optimasi struktur berdasarkan persyaratan kode dan peraturan adalah kemampuannya untuk mengatasi masalah desain yang optimal dengan pengurangan dari faktor reliabilitasnya yang sering terjadi dalam hal optimasi struktur secara nyata. Metode analisa probabilistik ini juga dibagi menjadi 3 kategori yaitu metode FORM, metode simulasi, metode *heuristic* (Kaveh & Mahdavi, 2015). Pada penelitian ini, realibilitas akan menggunakan metode *Latin Hypercube Sampling* (LHS). LHS adalah teknik yang sangat berguna dalam menganalisa situasi yang melibatkan risiko untuk mendapatkan perkiraan jawaban ketika sebuah eksperimen fisik atau penggunaan pendekatan analitis yang terlalu berat atau tidak dapat dilakukan dengan mudah. LHS ini membutuhkan sejumlah *random number* dan dilakukan *trial* serta pengulangan sehingga mendapat hasil yang mendekati *mean*, *variance*, dan karakteristik lainnya.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Reliability-Based Design Optimization (RBDO)

RBDO adalah masalah komputasi intensif dan sulit secara matematis bahkan dalam bentuknya yang paling sederhana. Karena itu digunakan dalam analisis ini, tujuan utamanya adalah untuk mengungkapkan karakteristik kinerja PSO dan SOS untuk masalah RBDO dari kelas tertentu. Untuk struktur rangka bidang penentu statis yang diberikan yang dimuat dengan pola beban tertentu, dikendalikan oleh satu parameter P , tujuannya adalah untuk meminimalkan jumlah biaya konstruksi dan biaya kegagalan struktural potensial (Wen 2001a). DV adalah daerah penampang A_i dari kelompok rangka batang yang diambil dari daftar luas penampang yang tersedia, ketinggian h_j dan panjang l_k yang mengontrol ukuran dan bentuk rangka.

2.2. Latin Hypercube Sampling

LHS adalah metode atau cara menghasilkan sampel acak dari nilai yang dijadikan sebagai parameter. Metode ini banyak digunakan dalam simulasi Monte Carlo, karena dapat mengurangi jumlah *run* yang diperlukan untuk mencapai hasil yang cukup akurat. Metode pengambilan sampel dari LHS ini dengan membagi fungsi dari grafik *cumulative density function* (CDF) menjadi beberapa bagian yang sama; dan kemudian memilih titik data acak di setiap bagian tersebut (Olsson, A. *et al.* 2003).

2.3. Metaheuristik

Heuristik berasal dari Bahasa Yunani '*heuriskein*' yang berarti seni untuk menemukan strategi dalam menyelesaikan persoalan sedangkan *meta* berarti metodologi tingkat tinggi atau lanjut (Talbi, 2009). Oleh karena itu, metaheuristik dapat didefinisikan sebagai suatu metode lanjut berbasis heuristic untuk menyelesaikan persoalan optimisasi secara efisien dalam kasus tertentu didaerah pencariannya. Metode ini mampu menghasilkan penyelesaian yang baik dalam waktu yang cepat (*acceptable*), tetapi tidak menjamin bahwa penyelesaian yang dihasilkan merupakan penyelesaian terbaik (*optimal*). Metode metaheuristik banyak dipakai dalam optimisasi stokastik (optimisasi stokastik merupakan optimisasi yang memiliki derajat ketidakpastian atau random).

2.3.1. Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO merupakan salah satu algoritma dari optimasi *swarm intelligence* yang diperkenalkan pada tahun 1995 oleh Kennedy dan Eberhart. PSO ini biasanya digunakan untuk mencari solusi dari suatu persamaan kontinu. Algoritma optimasi ini sendiri digambarkan seperti simulasi dari interaksi sosial antara organisme seperti kehidupan populasi burung ataupun ikan di laut. Organisme tersebut biasanya mencari tempat makan yang terbaik, tiap burung menggunakan informasi dari lokasi terbaik miliknya, lokasi terbaik milik kawanannya, dan lokasi sebelumnya. Dari interaksi tersebut, dibuat menjadi suatu algoritma dengan menggunakan randomisasi. Inisialisasi dari program ini adalah randomisasi dari suatu populasi di dalam suatu ruang pencarian tertentu. Partikel-partikel dalam ruang pencarian tersebut memiliki kecepatannya masing-masing, sehingga dapat bergerak secara acak dari satu lokasi ke lokasi lain. Salah satu keuntungan dari PSO adalah konsepnya yang sederhana, dan dapat diaplikasikan dalam pemrograman komputer dengan sederhana (Eberhart & Kennedy, 1995).

2.3.2. Symbiotic Organisms Search (SOS)

Algoritma SOS merupakan salah satu algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari interaksi antara organisme dalam suatu ekosistem. Hal tersebut sesuai dengan kehidupan makhluk hidup yang tidak dapat hidup sendiri melainkan memerlukan interaksi terhadap makhluk hidup yang lainnya. Interaksi dari makhluk hidup tersebut dapat disebut dengan simbiosis. Keuntungan menggunakan algoritma SOS dibandingkan dengan algoritma yang lainnya adalah tidak diperlukannya pengaturan parameter secara spesifik untuk dapat mengoperasikan algoritma SOS (Cheng & Prayogo, 2014). Sejak ditemukan, SOS sudah dipakai untuk menyelesaikan banyak permasalahan di teknik sipil khususnya dalam rangka batang (Cheng *et al.*, 2015; Tejani *et al.*, 2016 ; Tejani *et al.*, 2019). SOS mengambil tiga bentuk interaksi atau simbiosis antara lain fase mutualisme, fase komensalisme dan fase parasitisme.

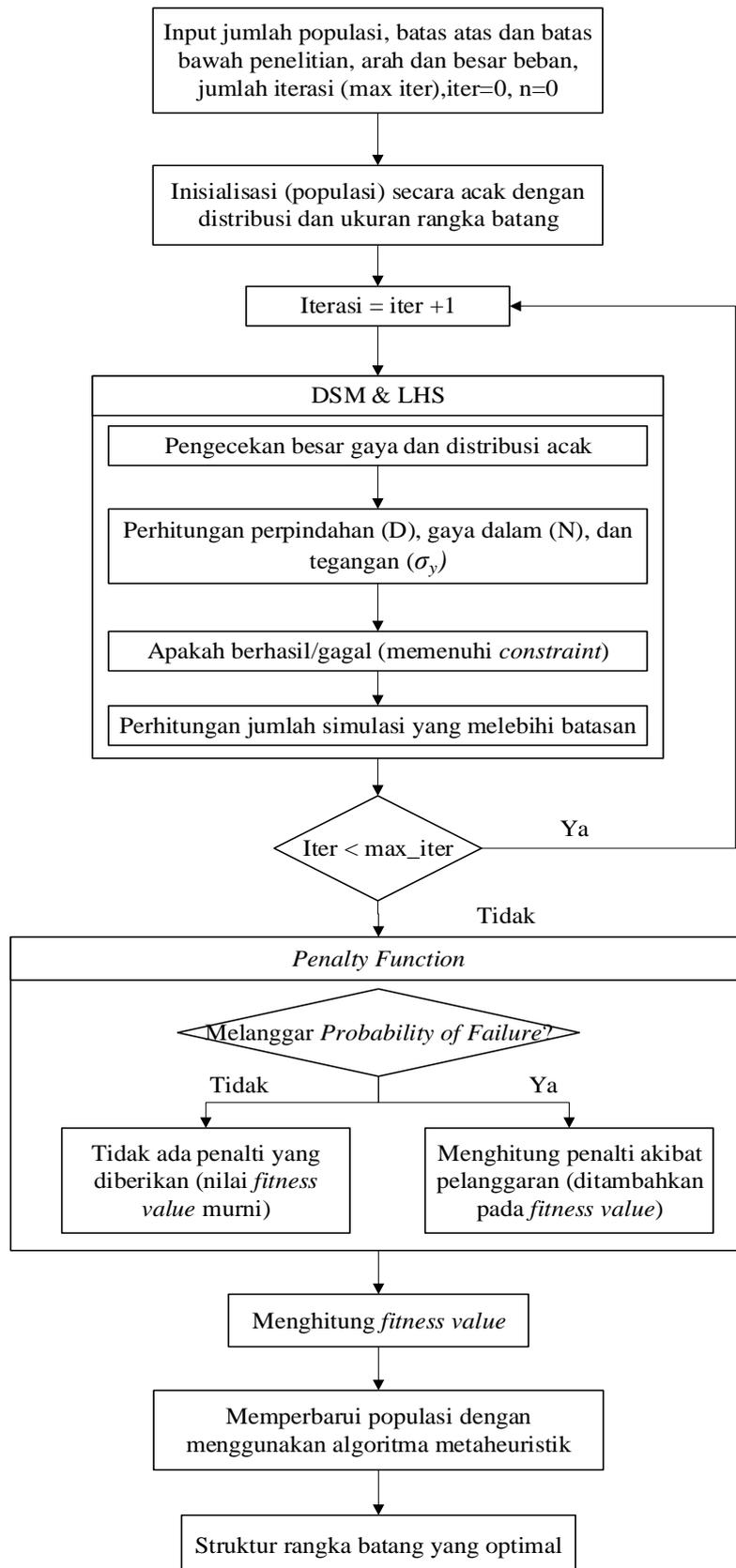
Dalam simbiosis mutualisme, dua organisme acak dipilih untuk berinteraksi secara mutualisme yang diharapkan dapat meningkatkan nilai kedua *fitness value* organisme tersebut. Hal serupa terjadi pada simbiosis komensalisme, hanya saja organisme kedua tidak mendapatkan keuntungan maupun kerugian dari hasil 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,

2.4. Kapasitas Tarik dan Tekan berdasarkan SNI 1729:2015

Profil Struktur Berongga (PSB) bulat dengan mutu BJ37 yang diambil dari (Gunawan, 1988) dengan total 49 ukuran untuk PSB Bulat 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.

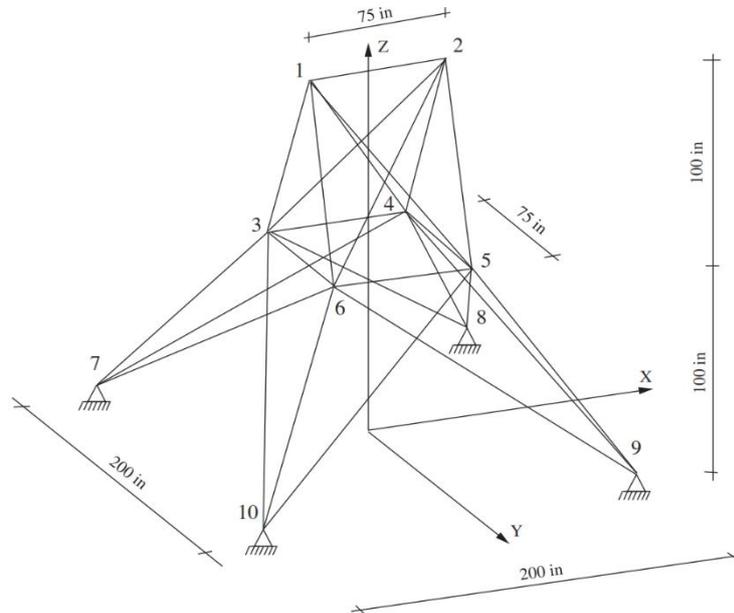
3. METODOLOGI PENELITIAN

Optimasi ukuran luas penampang rangka batang baja dilakukan dengan menggunakan metode RBDO dan cara mengkombinasikan DSM dengan algoritma metaheuristik seperti terlihat pada **Gambar 1**, sebagai dasar desain yang digunakan. *Ground structure* merupakan bentuk dasar struktur yang berisi seluruh kombinasi dari segala kemungkinan konektivitas antar *nodes* di dalam studi kasus. Untuk dapat membandingkan performa dari kedua algoritma tersebut, digunakan satu buah studi kasus, *25-bar truss* yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya (Cheng, Prayogo, Wu, & Lukito, 2016). Pada kasus ini, terdapat konstrain perpindahan dan tegangan maksimum. Karena pada penelitian ini digunakan SNI 1729:2015 sebagai acuan untuk menentukan kapasitas tarik dan tekan, maka *constraints* tegangan batang pada kasus awal dihilangkan. Kemudian, ditambahkan *constraints* kekuatan tarik dan tekan dari SNI 1729:2015. Masing-masing algoritma dijalankan sebanyak 30 *runs* dengan maksimal 3000 *function evaluations* untuk mengetahui konsistensi hasil optimasi dari masing-masing algoritma.



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

4. HASIL DAN DISKUSI



Gambar 2. Ground Structure dari Studi Kasus 25-Bar Truss

Ground structure terdiri 25 batang yang dibagi menjadi 8 kelompok yang sudah ditentukan, yaitu: (1) A1, (2) A2–A5, (3) A6–A9, (4) A10–A11, (5) A12–A13, (6) A14–A17, (7) A18–A21, (8) A21–A25. **Gambar 2** menunjukkan *ground structure* dari kasus ini. **Tabel 1** menunjukkan kondisi pembebanan pada studi kasus ini, **Tabel 2** menunjukkan *constraint* sesuai dengan studi kasus, dan **Tabel 3** menunjukkan parameter-parameter variabel acak untuk RBDO.

Tabel 1. Beban dan Constraints Studi Kasus 25-Bar Truss

Titik	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	4448.398	-444.8398	444.8398
2	0	444.8398	444.8398
3	2224.199	0	0
6	2669.039	0	0

Tabel 2. Beban dan Constraints Studi Kasus 25-Bar Truss

Parameter	Nilai
Modulus elatisitas (N/m ²)	2×10^{11} N/m ²
Massa jenis (kg/m ³)	7850 kg/m ³
Perpindahan maksimum (m)	0.00889 m

Tabel 3. Parameter Variabel Acak dari Studi Kasus SNI untuk RBDO

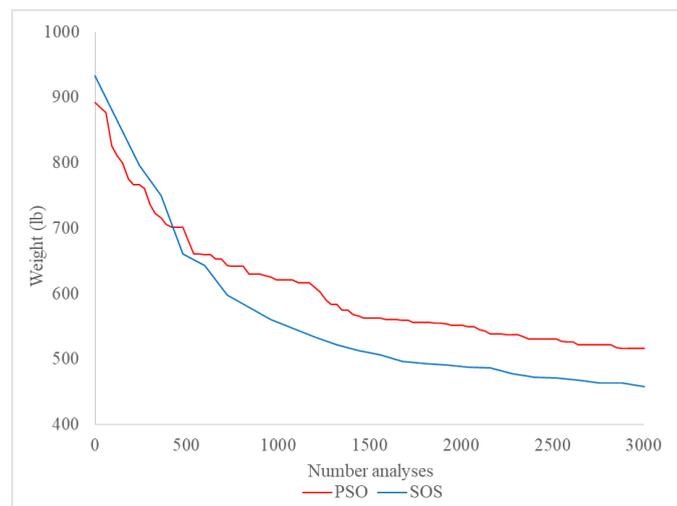
Parameter	Distribution	Mean	COV
Modulus Elastisitas (E)	Normal	2.10^6 N/m ²	5.00%
Beban (P)	Normal	Lihat Tabel 1	5.00%
Tegangan Leleh (Fy)	Normal	306.005 N/mm ²	6.30%
Tegangan Putus (Fu)	Normal	471.757 N/mm ²	6.30%

Tabel 4 menunjukkan hasil optimasi pada 25-bar truss dengan batasan sesuai SNI 1729:2015 pada hasil *run* terbaik pada PSB Bulat dengan mempertimbangkan RBDO. Dapat dilihat bahwa SOS mampu menemukan massa struktur paling ringan yaitu sebesar 408.913 kg, sedangkan PSO mampu menemukan massa struktur sebesar 428.548 kg. SOS masih lebih unggul daripada dari segi performanya dengan standar deviasi paling kecil yaitu sebesar 13.307 kg untuk RBDO. PSO memiliki performa yang paling buruk dibandingkan dengan SOS.

Tabel 4. Hasil dari Studi Kasus 25-Bar Truss PSB Bulat dengan RBDO

Variables		PSO	SOS
A1	m ²	0.0001238	0.0003510
A2-A5	m ²	0.0006465	0.0007591
A6-A9	m ²	0.0008636	0.0006465
A10-A11	m ²	0.0002291	0.0003345
A12-A13	m ²	0.0004205	0.0002919
A14-A17	m ²	0.0007591	0.0007591
A18-A21	m ²	0.0008636	0.0007591
A22-A25	m ²	0.0007591	0.0008636
Terbaik	kg	428.5481348	408.9131442
Terburuk	kg	532.0343368	469.6258940
Median	kg	465.0380575	424.7422782
Rata-Rata	kg	471.2693959	426.7479719
Standar Deviasi	kg	22.8535546	13.3073741
Perpindahan Maksimum	m	0.0062909	0.0060526
Tegangan Maksimum	N/m ²	97606300.4	95875131.0
<i>Function Evaluation</i>		3000	3000

Gambar 3 menunjukkan grafik konvergensi untuk RBDO dari masing-masing algoritma diambil dari hasil *run* median dari ke-30 *run* tersebut. Dapat dilihat bahwa SOS dapat menemukan massa terkecil dibanding PSO pada iterasi pertama maupun pada ± 3000 FE.



Gambar 3. Grafik konvergensi hasil *run* median pada kasus 25-bar truss PSB Bulat dengan batasan SNI dan mempertimbangkan RBDO

5. REKAPITULASI

Tabel 5 menunjukkan peringkat dari masing-masing algoritma untuk kelima kriteria yang ditinjau pada kasus *25-bar truss*. Angka 1 menunjukkan peringkat dengan performa terbaik diantara peringkat lainnya. Sebaliknya angka 2 menunjukkan peringkat dengan performa terburuk diantara peringkat lainnya.

Tabel 5. Rekapitulasi Peringkat Algoritma

Kriteria	PSO	SOS
25 bar PSB Bulat dengan RBDO		
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 2 buah algoritma metaheuristik yaitu PSO dan SOS dengan meninjau satu buah studi kasus *25-bar truss* dengan mempertimbangkan RBDO. Algoritma SOS memiliki performa terbaik dibandingkan dengan dua algoritma lainnya dalam kemampuannya menemukan massa kecepatan konvergensi, dan konsistensi. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan algoritma metaheuristik yang telah dimodifikasi agar dapat menemukan hasil optimasi yang lebih optimal dan konsisten. Selain itu juga dapat menggunakan metode *sampling* data atau metode iterasi yang lebih efektif sehingga dapat memperhitungkan lebih banyak sample acak atau dengan metode yang dapat memperkirakan hasil dengan metode *Neural Network* sehingga tidak perlu menggunakan banyak iterasi untuk mendapatkan perkiraan hasil di iterasi ke-n. Dan dengan metode-metode tersebut dapat menghemat waktu dan bisa menghasilkan hasil yang lebih optimal.

7. DAFTAR REFERENSI

- 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>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.023>
- Cheng, M. Y., Prayogo, D., & 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.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *Proceedings of The International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43.
- Gunawan, R. (1988). *Tabel Profil Konstruksi Baja* (Vol. 7th). Kanisius, Yogyakarta.
- Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2015). Colliding Bodies Optimization for Size and Topology Optimization of Truss Structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 53(5), 847–865. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.53.5.847>
- Lagaros, N. D., Plevris, V., & Papadrakakis, M. (2007). Reliability Based Robust Design Optimization of Steel Structures. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 1, 19–29, <http://dx.doi.org/10.1051/ijsmdo:2007003>

- Mathakari, S., Gardoni, P., Agarwal, P., Raich, A., & Haukaas, T. (2007). Reliability-Based Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi-Objective Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(4), 282–292. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2007.00485.x>
- Talbi E (2009) *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Hoboken
- Tejani, G. G., Savsani, V. J., & Patel, V. K. (2016). Adaptive Symbiotic Organisms Search (SOS) Algorithm for Structural Design Optimization. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3(3), 226-249.
- Tejani, G. G., Pholdee, N., Bureerat, S., Prayogo, D., & Gandomi, A. H. (2019). Structural Optimization Using Multi-Objective Modified Adaptive Symbiotic Organisms Search. *Expert Systems with Applications*, 125, 425-441
- Wen, Y.K. (2001a). “Minimum Lifecycle Design Under Multiple Hazards.” *Reliability Engineering and System Safety*, 73(3), 223-231.