

OPTIMASI UKURAN PENAMPANG RANGKA BATANG BAJA BERSKALA BESAR BERDASARKAN SNI 1729:2015 DENGAN METODE *SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH*

Wong Foek Tjong¹, Doddy Prayogo², Reinard Eka Putra³, Jan Joseph⁴

^{1,2} Dosen Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

^{3,4} Alumnus Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

¹ E-mail: wftjong@petra.ac.id; ² E-mail: prayogo@petra.ac.id

³ E-mail: m21414048@john.petra.ac.id; ⁴ E-mail: m21414227@john.petra.ac.id

ABSTRAK

Struktur rangka batang yang ekonomis namun memenuhi persyaratan desain yang berlaku adalah tujuan dari perencanaan struktur. Dalam tiga dekade ini, banyak peneliti telah mengembangkan dan menerapkan berbagai metode optimasi metaheuristik dalam desain struktur rangka batang. Makalah ini menyajikan penerapan suatu metode metaheuristik yang mengadopsi hubungan simbiosis antar organisme dalam suatu ekosistem biologis, yang dinamakan *sybiotic organisms search* (SOS), dalam mengoptimasi ukuran penampang rangka batang baja berskala besar. Syarat desain yang dipakai adalah spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural, SNI 1729: 2015. Struktur yang ditinjau adalah rangka batang ruang kubah 120-batang dan rangka batang piramida 160-batang. Hasil optimasi dengan SOS kemudian dibandingkan dengan hasil optimasi menggunakan metode-metode metaheuristik lainnya dan suatu *software* komersial. Hasil studi menunjukkan bahwa SOS adalah metode dapat diandalkan untuk mengoptimasi struktur rangka batang berskala besar.

KATA KUNCI: optimasi rangka batang, metaheuristik, SNI 1729:2015, *sybiotic organisms search*

ABSTRACT

An economical truss structure yet satisfying the governing design codes is the desire of a structural designer. In the three past decades, many researchers have developed and applied various metaheuristic optimization methods in the design of truss structures. This paper presents applications of the so-called sybiotic organisms search (SOS) method, a new metaheuristic method that simulates the sybiotic interaction between organisms in an ecosystem, to optimize the member sizes of large scale steel truss structures. The design requirements follow the Specification for Structural Steel Building, SNI 1729:2015. The SOS is applied to optimize two spatial truss structures, namely, a 120-bar dome truss and a 160-bar pyramid truss. The results using the SOS are then compared to those using other metaheuristic methods and a commercial software. The results show that the SOS is a reliable method in optimizing member sizes of truss structures.

KEYWORDS: truss optimization, metaheuristic, SNI 1729:2015, *sybiotic organisms search*

1. PENDAHULUAN

Menghasilkan struktur yang memenuhi persyaratan kekuatan dan *serviceability* menurut *design code* yang berlaku namun cukup ekonomis merupakan tujuan dari insinyur struktur dan merupakan harapan dari para pemangku kepentingan, terutama pemilik proyek. Untuk struktur rangka batang baja, tujuan ini dapat dicapai bila rangka batang didesain

sedemikian rupa sehingga penggunaan material baja seringan mungkin namun struktur itu tetap memenuhi semua persyaratan desain yang diminta. Struktur rangka batang baja yang optimum dapat dicapai dengan melakukan optimasi terhadap (Flager et al., 2014; Jiang, Tang, Seidel, & Wonka, 2017): (1) *bentuk* rangka batang, yang menyangkut posisi (koordinat) dari *joint*, (2) *topologi* rangka batang, yang menyangkut konektivitas batang dan jumlah *joint*, dan (3) *ukuran penampang* setiap batang. Makalah ini membahas masalah optimasi ukuran penampang pada struktur rangka batang ruang yang telah diketahui bentuk dan topologinya.

Dalam praktek desain struktur konvensional, setelah bentuk dan konektivitas batang-batang ditetapkan, desain rangka batang dimulai dengan menebak ukuran-ukuran penampang berdasarkan *engineering judgment* insinyur struktur yang diperoleh dari pengalaman dengan jenis struktur yang serupa. Kemudian analisis struktur dan pengecekan terhadap persyaratan kekuatan dan *serviceability* dilakukan terhadap rangka batang dengan ukuran tebakan awal ini. Dari hasil pengecekan ini, bila terdapat batang yang tidak memenuhi syarat, misalnya kekuatannya kurang, maka ukuran batang ini (luas penampang) diganti yang lebih besar dari daftar profil baja yang tersedia di pasaran. Sebaliknya, bila rasio kekuatannya berlebih, ukuran batang dicoba memakai yang lebih kecil. Kemudian dilakukan analisis dan pengecekan kinerja struktur dengan penampang yang baru ini. Proses ini dilakukan terus sampai diperoleh hasil desain yang memuaskan (cukup optimum). Jadi, pada prinsipnya optimasi ukuran penampang dilakukan seorang insinyur struktur dengan melakukan *proses iterasi* analisis dan pengecekan secara manual.

Untuk struktur rangka batang ruang yang besar dan kompleks, proses iterasi manual ini menjadi sulit dan tidak menjamin tercapainya hasil desain yang optimum. Flager et al. (2014) dalam papernya memberikan contoh desain struktur nyata, yakni struktur atap suatu stadium atletik berkapasitas 65000 tempat duduk. Struktur ini adalah rangka batang ruang berbentuk *arch* dengan bentang 210 m, ketinggian maksimum 72 m, dan jumlah batang 1955. Optimasi desain struktur dilakukan secara paralel: (1) dengan cara desain konvensional oleh perusahaan konsultan desain struktur yang terkemuka dan berpengalaman dan (2) dengan suatu algoritma optimasi yang dikembangkan oleh Flager et al. (2014), yang dinamakan algoritma *fully constrained design* (FCD). Hasil desain dengan algoritma optimasi FCD ternyata 19% lebih ringan daripada hasil desain terbaik yang dilakukan secara konvensional. Akhirnya, konsultan desain struktur memilih untuk menyerahkan hasil desain dengan FCD kepada kontraktor untuk tender. Contoh ini memberikan gambaran pentingnya peran algoritma optimasi, yang dapat melakukan proses iterasi secara otomatis, dalam desain struktur rangka batang berskala besar.

Dalam beberapa dekade terakhir ini, para peneliti dalam bidang metode optimasi telah mengembangkan berbagai macam metode numerik (algoritma) optimasi yang diinspirasi dari fenomena alam. Metode-metode optimasi ini, yang dinamakan metode *metaheuristik*, merupakan metode stokastik (non-deterministik) yang memanfaatkan keacakan atau variasi alam dan aturan-aturan seleksi alam untuk mencari solusi yang mendekati optimum. Berbagai metode metaheuristik telah diaplikasikan untuk optimasi desain struktur rangka batang, sebagai contoh: Rajeev dan Krishnamoorthy (1992) menerapkan suatu

genetic algorithm untuk optimasi struktur rangka batang menara transmisi 160-batang, Kaveh dan Talatahari (2009) memakai algoritma optimasi *hybrid big bang-big crunch* untuk optimasi berbagai rangka batang ruang yang besar, Cheng, Prayogo, Wu, dan Lukito (2016) menguji suatu varian algoritma *harmony search* terhadap enam contoh masalah optimasi ukuran rangka batang.

Baru-baru ini suatu algoritma optimasi metaheuristik yang dinamakan *symbiotic organisms search* (SOS) telah dikembangkan oleh Cheng dan Prayogo (2014). Algoritma SOS ini mensimulasikan hubungan simbiosis antara makhluk hidup (organisme) dalam suatu ekosistem. Keunggulan utama algoritma ini dibandingkan berbagai metode metaheuristik lainnya adalah pengoperasian algoritma ini tidak memerlukan suatu parameter selain jumlah organisme dan kriteria penghentian iterasi. Dalam paper aslinya (Cheng & Prayogo, 2014), kinerja SOS telah diuji dan dibandingkan dengan berbagai metode metaheuristik lainnya pada masalah-masalah optimasi fungsi matematis standar dan beberapa masalah optimasi standar dalam *engineering*. Hasil pengujian ini menunjukkan kinerja algoritma SOS yang sangat baik dalam menyelesaikan berbagai masalah optimasi yang cukup rumit. Aplikasi lebih lanjut dari algoritma SOS dalam berbagai masalah optimasi dalam bidang teknik sipil dipaparkan oleh Prayogo, Cheng, dan Prayogo (2017). Beberapa penelitian telah mencoba memodifikasi SOS supaya kinerjanya lebih baik lagi, sebagai contoh algoritma *enhanced SOS* (Prayogo, Wong, & Sugianto, 2018). Suatu studi pustaka yang lengkap mengenai perkembangan terkini varian-varian SOS dan aplikasinya dalam berbagai bidang dipaparkan oleh Ezugwu dan Prayogo (2019).

Algoritma SOS juga telah diaplikasikan untuk mendapatkan ukuran penampang rangka batang baja yang paling ringan (Prayogo, Wong, Gunawan, Ali, & Sugianto, 2018). Dalam studi mereka ini, peraturan desain yang dipakai ini adalah “Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural”, SNI 1729:2015. Struktur rangka batang yang dioptimasi mencakup struktur rangka batang bidang 10 batang, 15 batang, 52 batang dan rangka batang ruang 52 batang dan 72 batang. Hasil desain dengan algoritma SOS kemudian dibandingkan dengan hasil-hasil yang diperoleh dengan menggunakan algoritma metaheuristik lainnya, yaitu *particle swarm optimization* (Eberhart & Kennedy, 1995), *differential evolution* (Storn & Price, 1997), dan *teaching-learning-based optimization* (Rao, Savsani, & Vakharia, 2011). Hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan kinerja algoritma SOS yang lebih baik, dari segi akurasi dan konsistensi, dibandingkan tiga algoritma metaheuristik lainnya.

Struktur-struktur rangka batang yang dioptimasi dalam studi terdahulu (Prayogo, Wong, Gunawan, et al., 2018) yang paling besar adalah struktur menara rangka batang ruang dengan 72 batang. Makalah ini menyajikan pengujian lebih lanjut algoritma SOS untuk optimasi ukuran penampang rangka batang ruang baja berskala lebih besar, yaitu: (1) struktur kubah 120 batang dan (2) struktur piramida 160 batang. Seperti pada penelitian sebelumnya, analisis struktur dilakukan dengan metode elemen hingga dan desain kekuatan struktur baja didasarkan pada desain faktor beban dan ketahanan, mengacu kepada Spesifikasi SNI 1729:2015. Penampang yang digunakan adalah profil struktur berongga (PSB) bulat (*circular hollow structural section*) yang dipilih dari profil-profil

berukuran standar AISC (1989). Sambungan antara batang diasumsikan menggunakan sambungan las atau sistem *ball-node joint* dengan kekuatan desain paling tidak sama dengan kekuatan desain dari batang yang disambung. Hasil optimasi dengan algoritma SOS akan dibandingkan dengan hasil optimasi dengan algoritma metaheuristik lainnya dan juga dengan suatu *commercial software* (CS) untuk analisis dan desain struktur.

2. PERUMUSAN MASALAH OPTIMASI STRUKTUR RANGKA BATANG

Tujuan optimasi desain ukuran penampang pada struktur rangka batang adalah untuk mendapatkan rangka batang dengan *berat minimum* tetapi tetap *memenuhi syarat-syarat desain* yang berlaku. Optimasi ukuran ini dilakukan dengan cara memilih profil batang-batang dari suatu tabel profil yang standar atau yang tersedia di pasaran. Untuk suatu rangka batang yang tersusun dari N_m batang (*bar member* atau *element*) yang dikelompokkan ke dalam N_d macam ukuran profil, masalah optimasi ukuran penampang dapat dirumuskan sebagai berikut:

2.1. Fungsi objektif

Tujuan dari optimasi ini adalah mendapatkan suatu vektor,

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_d}]^T \quad (1)$$

yang merepresentasikan urutan penampang yang tersedia dalam tabel profil baja dan berkorespondensi dengan vektor dari luas penampang,

$$\mathbf{A} = [A_1, A_2, \dots, A_{N_m}]^T \quad (2)$$

sedemikian sehingga *fungsi objektif* berat struktur,

$$W(\mathbf{A}) = \sum_{m=1}^{N_m} \rho_m L_m A_m \quad (3)$$

bernilai minimum. Dalam persamaan ini, W adalah berat struktur dan ρ_m, L_m, A_m secara berurutan adalah berat jenis, panjang dan luas penampang setiap elemen batang. Jumlah jenis profil, N_d , merupakan jumlah variabel desain dalam masalah optimasi ini.

2.2. Fungsi pembatas

Persyaratan desain batang tarik

Untuk batang tarik, rasio kelangsingan batang disarankan tidak melebihi 300 (Catatan dalam Pasal D1, SNI 1729:2015). Kekuatan batang tarik disyaratkan paling tidak sama dengan besar gaya tarik yang diakibatkan oleh beban terfaktor. Kedua batasan ini dirumuskan untuk setiap batang $m = 1, \dots, N_m$ sbb.

$$\lambda_m = \frac{K_m L_m}{r_m} \leq 300 \text{ if } P_{um} > 0 \quad (4)$$

$$\phi_t P_{nm} \geq P_{um} \text{ if } P_{um} > 0 \quad (5)$$

Dalam pers. (4), λ_m adalah rasio kelangsingan batang ke- m , K_m adalah faktor panjang efektif batang ke- m , L_m adalah panjang batang ke- m tanpa pengekang lateral, r_m adalah radius girasi penampang batang ke- m , dan P_{um} adalah gaya dalam aksial pada batang ke- m akibat beban terfaktor, dengan perjanjian tanda positif bila tarik dan negatif bila tekan.

Nilai K_m diambil sama dengan satu untuk semua batang karena kondisi tumpuan setiap batang adalah sendi-sendi tidak bergoyang (konsisten dengan model struktur rangka batang ruang). Gaya-gaya dalam P_{um} ini diperoleh dari analisis struktur dengan metode elemen hingga. Dalam pers. (5), ϕ_t adalah faktor reduksi kekuatan tarik = 0.9 atau 0.75, dan P_{nm} adalah kekuatan tarik nominal batang ke- m .

Kekuatan tarik desain, $\phi_t P_{nm}$, diambil nilai terendah dari keadaan batas leleh tarik pada penampang bruto dan keruntuhan tarik pada penampang neto (Pasal D2, SNI 1729:2015), yaitu

$$\phi_t P_{nm} = \min(0.9F_y A_{gm}, 0.75F_u A_{em}) \quad (6)$$

Dalam persamaan ini, F_y adalah tegangan leleh minimum yang disyaratkan, F_u adalah kekuatan tarik minimum yang disyaratkan, A_{gm} adalah luas bruto dari penampang profil batang ke- m , dan A_{em} adalah luas efektif dari penampang profil batang ke- m . Sambungan batang diasumsikan menggunakan sambungan las dengan panjang las lebih besar dari 1.3 kali diameter profil PSB bulat (Tabel D3.1, SNI 1729:2015) atau dengan sambungan *ball-node joint*, sehingga $A_{em} = A_g$ untuk semua batang tarik.

Persyaratan desain batang tekan

Untuk batang tekan, rasio kelangsingan batang disarankan tidak melebihi 200 (Catatan dalam Pasal E2, SNI 1729:2015). Kekuatan batang tekan disyaratkan paling tidak sama dengan besar gaya tekan yang diakibatkan oleh beban terfaktor. Batasan-batasan ini dirumuskan untuk setiap batang $m = 1, \dots, N_m$ sbb.

$$\lambda_m = \frac{K_m L_m}{r_m} \leq 200 \text{ if } P_{um} \leq 0 \quad (7)$$

$$\phi_c P_{nm} \geq -P_{um} \text{ if } P_{um} \leq 0 \quad (8)$$

Dalam pers. (8), ϕ_c adalah faktor reduksi kekuatan tekan = 0.9 (Pasal E1, SNI 1729:2015), dan P_{nm} adalah kekuatan tekan nominal batang ke- m .

Kekuatan tekan batang ke- m dihitung menurut Pasal E3 dan E7 dari SNI 1729:2015, yaitu:

$$P_{nm} = F_{crm} A_{gm} \quad (9)$$

Tegangan kritis batang ke- m , F_{crm} , ditentukan sbb.:

$$F_{crm} = \begin{cases} Q \left[0,658 \frac{Q F_y}{F_{em}} \right] F_y & \text{if } \lambda_m \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q F_y}} \\ 0.877 F_{em} & \text{if } \lambda_m > 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q F_y}} \end{cases} \quad (10)$$

di mana F_{em} adalah tegangan tekuk kritis elastis untuk batang ke- m , yaitu

$$F_{em} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_m^2} \quad (11)$$

dan E adalah modulus elastisitas baja. Faktor Q dalam pers. (10) adalah faktor reduksi untuk memperhitungkan pengaruh ketebalan relatif batang tekan (atau kelangsingan terhadap tekuk lokal), yang ditentukan sbb.

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{untuk profil tanpa elemen langsing} \\ Q_s Q_a & \text{untuk profil dengan elemen langsing} \end{cases} \quad (12)$$

di mana Q_s dan Q_a masing-masing adalah faktor-faktor reduksi untuk elemen langsing yang tidak diperkaku (*unstiffened*) dan diperkaku (*stiffened*). Dalam studi ini, profil yang digunakan adalah PSB bulat. Menurut Tabel B4.1a dari SNI 1729:2015, profil ini dikategorikan sebagai profil dengan elemen langsing jika rasio diameter, D , terhadap ketebalan profil, t ,

$$\frac{D}{t} > \lambda_r = 0.11 \frac{E}{F_y} \quad (13)$$

Jika profil ini langsing, PSB bulat merupakan elemen langsing yang diperkaku, sehingga $Q_s = 1$ dan nilai Q_a ditentukan sbb. (Pasal E7 SNI 1729:2015)

$$\text{If } 0.11 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} < 0.45 \frac{E}{F_y}, \text{ then } Q_a = \frac{0,038E}{F_y \left(\frac{D}{t}\right)} + \frac{2}{3} \quad (14)$$

3. METODE OPTIMASI SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH

Algoritma SOS adalah algoritma metaheuristik yang mensimulasikan perilaku simbiosis antara organisme di alam dengan tujuan untuk mencari organisme yang paling baik (*the fittest organism*) (Cheng & Prayogo, 2014). Hubungan simbiosis yang umum dijumpai di alam adalah mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Mutualisme adalah hubungan antara dua spesies berbeda di mana kedua spesies mendapatkan manfaat. Komensalisme adalah hubungan antara dua spesies berbeda di mana yang satu diuntungkan sedangkan yang lain tidak terpengaruh atau netral. Parasitisme adalah hubungan antara dua spesies berbeda di mana yang satu diuntungkan dan yang lain terkena bahaya. Contoh dari ketiga hubungan tersebut diilustrasikan dalam Gambar 1.



(a) Simbiosis bunga dan kupu-kupu



(b) Simbiosis hiu dan ikan remora



(c) Simbiosis manusia dan nyamuk anopheles

Gambar 1 Contoh simbiosis: (a) mutualisme, (b) komensalisme, (c) parasitisme

Algoritma SOS terdiri dari fase inialisasi dan fase simbiosis, yang meliputi sub-fase mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Dalam fase inialisasi diciptakan sejumlah organisme (sejumlah struktur rangka batang) dengan nilai-nilai variabel desain (profil batang-batang) yang ditetapkan secara acak. Kemudian setiap organisme akan saling berinteraksi satu dengan yang lain secara acak dan akan mengalami ketiga sub-fase simbiosis tersebut. Tujuan dari fase simbiosis ini adalah untuk meningkatkan *fitness value* dari organisme tersebut (yakni, mendapatkan berat struktur yang lebih ringan). Fase simbiosis ini akan diulang terus (di-iterasi) sampai mendapatkan hasil yang diharapkan.

Pseudo-code untuk menggambarkan algoritma SOS secara garis besar adalah sbb (Prayogo, Wong, Gunawan, et al., 2018):

```

1: Masukkan parameter-parameter algoritma:
   yaitu jumlah organisme dan kriteria berhenti
2: Inisialisasi ekosistem dengan variabel acak
3: while (belum memenuhi kriteria berhenti) do
4:     for  $i = 1$  s/d jumlah organisme
5:         % Fase mutualisme
6:         Pilih organisme  $j$  secara acak dari ekosistem
7:         Modifikasi organisme  $i$  dan  $j$  melalui simbiosis mutualisme
8:         Evaluasi fitness value dari organisme  $i$  dan  $j$ 
9:         Terima hasil modifikasi jika lebih baik dari sebelumnya
10:        % Fase komensalisme
11:        Pilih organisme  $j$  secara acak dari ekosistem
12:        Modifikasi organisme  $i$  melalui simbiosis komensalisme
13:        Evaluasi fitness value dari organisme  $i$ 
14:        Terima hasil modifikasi jika lebih baik dari sebelumnya
15:        % Fase parasitisme
16:        Pilih organisme  $j$  secara acak dari ekosistem
17:        Bentuk organisme “parasit” melalui simbiosis parasitisme
18:        Evaluasi fitness value dari parasit
19:        Matikan organisme  $j$  jika fitness value dari parasit lebih baik,
           sebaliknya jika fitness value dari organisme  $j$  lebih baik,
           parasit mati
20:     end for
21: end while

```

Penjelasan mengenai sub-sub fase dalam fase simbiosis adalah sbb. (Cheng & Prayogo, 2014; Prayogo, Wong, Gunawan, et al., 2018):

3.1. Sub-fase mutualisme

Pada iterasi ke- i dari *for loop* dalam algoritma SOS, perhatian diberikan kepada organisme \mathbf{x}_i (yaitu, struktur rangka batang dengan profil penampang batang diberikan oleh vektor \mathbf{x}_i). Organisme lain, \mathbf{x}_j , kemudian dipilih secara acak dari ekosistem (kumpulan struktur rangka batang yang diciptakan pada fase inisialisasi). Kandidat solusi baru, yaitu $\text{new_}\mathbf{x}_i$ dan $\text{new_}\mathbf{x}_j$ dibentuk berdasarkan simbiosis mutualisme antara organisme \mathbf{x}_i dan \mathbf{x}_j , yang dimodelkan sbb:

$$\text{new_}\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \text{rand}(0,1)(\mathbf{x}_{\text{best}} - (BF_1)\bar{\mathbf{x}}_{ij}) \quad (15\text{-a})$$

$$\text{new_}\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_j + \text{rand}(0,1)(\mathbf{x}_{\text{best}} - (BF_2)\bar{\mathbf{x}}_{ij}) \quad (15\text{-b})$$

$$BF_1 = 1 \text{ or } 2, \quad BF_2 = 1 \text{ or } 2, \quad \bar{\mathbf{x}}_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_i + \mathbf{x}_j) \quad (15\text{-c})$$

Dalam persamaan ini, $\text{rand}(0,1)$ adalah bilangan acak berdistribusi rata antara 0 dan 1, \mathbf{x}_{best} adalah organisme terbaik (*the fittest*) dalam ekosistem, dan BF_1 dan BF_2 adalah

benefit factors untuk organisme 1 dan 2, nilainya diambil secara acak, 1 atau 2. Organisme new_x_i dan new_x_j menggantikan x_i dan x_j hanya jika *fitness value*-nya lebih baik daripada *fitness value* organisme sebelum bersimbiosis mutualisme.

3.2. Sub-fase komensalisme

Seperti pada sub-fase sebelumnya, organisme x_j dipilih secara acak dari ekosistem untuk berinteraksi dengan x_i . Kandidat solusi baru, yaitu new_x_i , dibentuk berdasarkan simbiosis komensalisme antara organisme x_i dan x_j , yang dimodelkan

$$new_x_i = x_i + \text{rand}(-1,1)(x_{\text{best}} - x_j) \quad (16)$$

Organisme new_x_i menggantikan x_i hanya jika *fitness value*-nya lebih baik daripada *fitness value* x_i .

3.3. Sub-fase parasitisme

Dalam sub-fase ini, organisme x_i diberi peran untuk memproduksi parasit buatan yang dinamakan vektor parasit. Vektor ini merupakan suatu modifikasi dari vektor x_i yang dimodelkan sbb.:

$$parasite_vector = \mathbf{F} * x_i + (\mathbf{1}-\mathbf{F}) * (\text{rand}(0,1)(x_{\text{ub}} - x_{\text{lb}})) \quad (17)$$

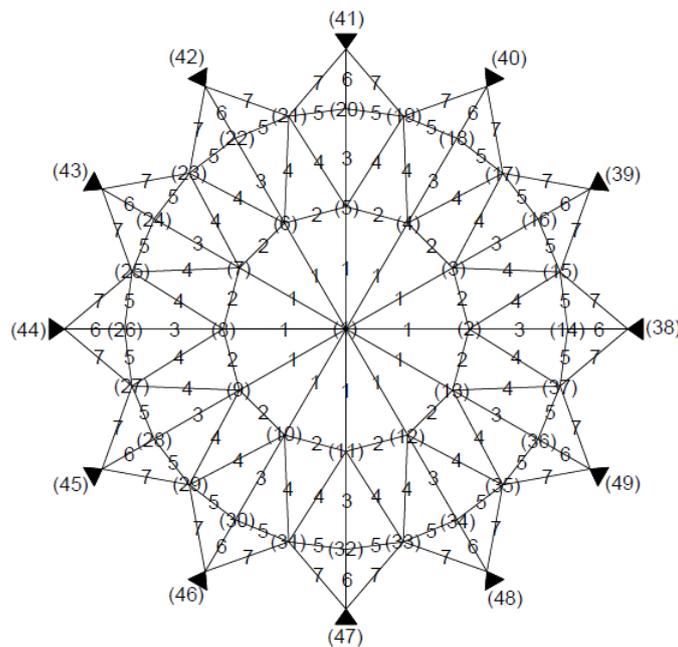
Dalam persamaan ini, \mathbf{F} adalah suatu vektor biner acak yang bertujuan untuk menentukan secara acak variabel-variabel solusi yang akan dimodifikasi; x_{ub} dan x_{lb} adalah vektor-vektor batas atas dan batas bawah dari *searching space* (yaitu, domain fungsi di mana nilai optimal sedang dicari); operator $*$ menyatakan operasi perkalian elemen per elemen dalam dua vektor yang dikalikan. Kemudian, organisme x_j dipilih secara acak dari ekosistem dan berfungsi sebagai “rumah” bagi vektor parasit. Kedua organisme ini kemudian dievaluasi *fitness value*-nya. Jika vektor parasit memiliki *fitness value* yang lebih baik, dia akan membunuh organisme x_j . Sebaliknya, jika *fitness value* dari x_j lebih baik, organismen x_j akan bertahan dan vektor parasit akan mati.

4. APLIKASI ALGORITMA SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH

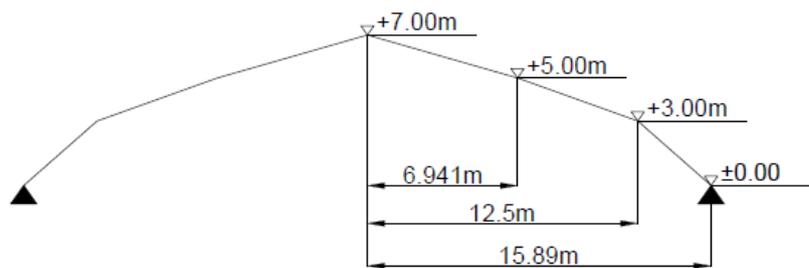
Algoritma SOS diaplikasikan pada dua rangka batang baja yang cukup besar, yaitu (1) struktur kubah 120 batang dan (2) struktur piramida 160 batang. Berat struktur akan diminimumkan dengan memilih satu kelompok profil penampang batang dari 37 PSB bulat yang terdapat dalam tabel penampang standar AISC (1989). Parameter algoritma SOS yang digunakan adalah jumlah organisme = 20 dan jumlah evaluasi *fitness value* = 50,000 (kriteria penghentian iterasi). Karena algoritma SOS adalah algoritma nondeterministik, maka hasil setiap perjalanan (*run*) program mungkin berbeda. Oleh karena itu, untuk meneliti konsistensi algoritma SOS, perhitungan optimasi dengan SOS dilakukan 30 kali. Hasil optimasi terbaik dari SOS akan dibandingkan dengan hasil optimasi terbaik menggunakan algoritma-algoritma metaheuristik *particle swarm optimization* (PSO), *differential evolution* (DE), *teaching-learning-based optimization* (TLBO) dan suatu *commercial software* (CS).

4.1. Rangka Batang Kubah 120 Batang

Rangka batang dengan 120 batang ini pertama kali digunakan oleh Soh dan Yang (1996) untuk studi kasus optimasi bentuk. Lalu struktur ini digunakan sebagai studi kasus untuk optimasi berat oleh Kaveh dan Mahdavi (2014). Geometri, perletakan dan pengelompokan penampang dari model struktur ini dapat dilihat pada Gambar 2. Sifat-sifat material baja yang dipakai adalah $\rho = 7972 \text{ kg/m}^3$, $E = 210,000 \text{ MPa}$, dan $F_y = 400 \text{ MPa}$. Beban yang bekerja adalah beban terpusat 60 kN ke bawah pada titik (1), 30 kN ke bawah pada titik (2) hingga (13), dan 10 kN ke bawah pada titik-titik lainnya.



(a) Tampak atas dan pengelompokan penampang batang



(b) Tampak samping struktur kubah

Gambar 2 Model struktur rangka batang kubah 120 batang

Profil terbaik yang dihasilkan dari 30 kali perjalanan optimasi desain dengan SOS disajikan pada Tabel 1, bersama dengan profil-profil hasil optimasi dengan menggunakan metode-metode pembandingan. Statistik berat yang dihasilkan dari 30 percobaan dengan SOS ini disajikan pada Tabel 2 bersama dengan yang dengan metode-metode pembandingan. Hasil-hasil ini menunjukkan kinerja yang sangat baik dari algoritma SOS, yaitu memberikan hasil desain yang paling ringan dibandingkan metode-metode lainnya dan hasilnya konsisten untuk setiap perjalanan program (koefisien variasinya sangat

kecil). Gambar 3 menunjukkan tegangan yang terjadi pada setiap batang dan kekuatan desain batang hasil optimasi terbaik dengan algoritma SOS. Gambar ini memperlihatkan bahwa meskipun SOS memberikan luas-luas penampang yang minimum, namun syarat kekuatan desain setiap batang terpenuhi.

Tabel 1 Profil hasil optimasi desain rangka batang kubah 120 batang

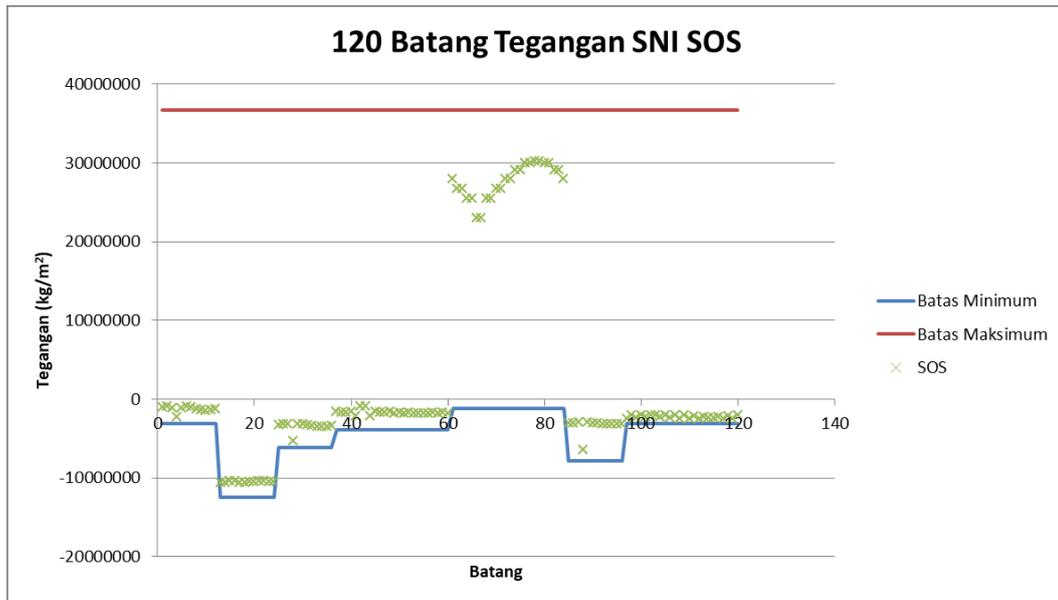
Luas* (mm ²)	SOS	PSO	DE	TLBO	CS
A1	1439	1439	1439	1439	5419
A2	1439	13742	1439	1439	1729
A3	1729	1729	1729	1729	2774
A4	1439	1439	1439	1439	1729
A5	279	13742	279	279	1439
A6	1439	13742	1439	1439	2045
A7	1097	1097	1097	1097	1729

*Hasil terbaik dari 30 kali penjalanan program

Tabel 2 Statistik berat hasil optimasi desain rangka batang kubah 120 batang

Berat (kg)	SOS	PSO	DE	TLBO	CS
Terbaik	6246	24207	6246	6246	11507
Rata-rata	6276	41294	24039	6937	-
Deviasi standar	70.42	7478	20790	710	-
Koefisien variasi (%)	1.12	18.11	86.48	10.24	-
Jumlah run yang berhasil*	30	30	8	19	-

*Jumlah runs yang dilaporkan kurang dari 30 karena beberapa hasil melanggar batasan desain yang sudah ditentukan.



Gambar 3 Tegangan pada setiap batang dan batas kekuatan desainnya untuk penampang terbaik hasil optimasi dengan SOS pada rangka batang kubah 120 batang

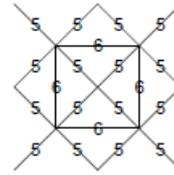
4.2. Rangka Batang Piramida 160 Batang

Struktur rangka batang berbentuk piramida ini pertama kali digunakan oleh Hasançebi, Çarbas, dan Saka (2011) untuk menyelidiki kinerja dari metode *ant colony optimization*. Bentuk dan pengelompokan penampang batang dari model piramida 160 batang ini dapat dilihat pada Gambar 4. Sifat-sifat material baja yang dipakai adalah $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $E = 200,000 \text{ MPa}$, dan $F_y = 248 \text{ MPa}$. Beban yang bekerja adalah beban terpusat sebesar 8.53 kN ke bawah pada seluruh titik nodal selain titik-titik perletakan.

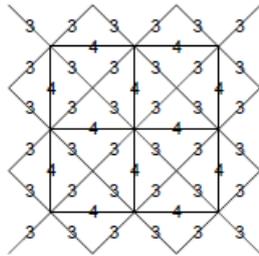
Luas penampang profil hasil optimasi terbaik dari 30 kali perjalanan algoritma SOS dan metode-metode pembandingan disajikan dalam Tabel 3. Statistik berat berdasarkan 30 kali perjalanan program disajikan dalam Tabel 4. Tegangan yang terjadi pada setiap batang dibandingkan terhadap kekuatan desain masing-masing batang diperlihatkan pada Gambar 5. Hasil-hasil ini kembali memperlihatkan kinerja yang sangat baik dari algoritma SOS dalam mengoptimasi struktur rangka batang piramida. Berat yang dihasilkan sama dengan berat hasil optimasi dengan metode-metode metaheuristik lainnya, tanpa melanggar persyaratan desain kekuatan (lihat Gambar 5). Dalam studi kasus ini bahkan secara mengejutkan didapatkan simpangan deviasi dari dua metode metaheuristik, yaitu SOS dan DE, nol, Ini menunjukkan konsistensi algoritma SOS dan DE yang sangat baik untuk kasus optimasi ini.



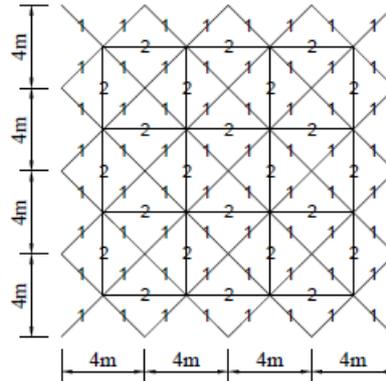
a) Potongan pada $6\text{ m} < z \leq 8\text{ m}$



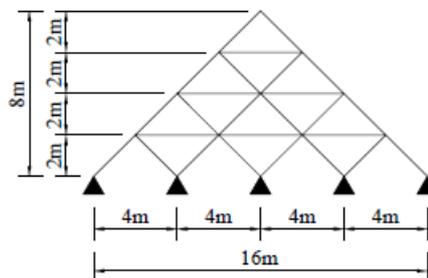
b) Potongan pada $4\text{ m} < z \leq 6\text{ m}$



c) Potongan pada $2\text{ m} < z \leq 4\text{ m}$



d) Potongan pada $0 < z \leq 2\text{ m}$



e) Tampak samping struktur piramida

Gambar 4 Model struktur rangka batang piramida 160 batang dan pengelompokan penampang batang (sambungan gambar pada halaman sebelum ini)

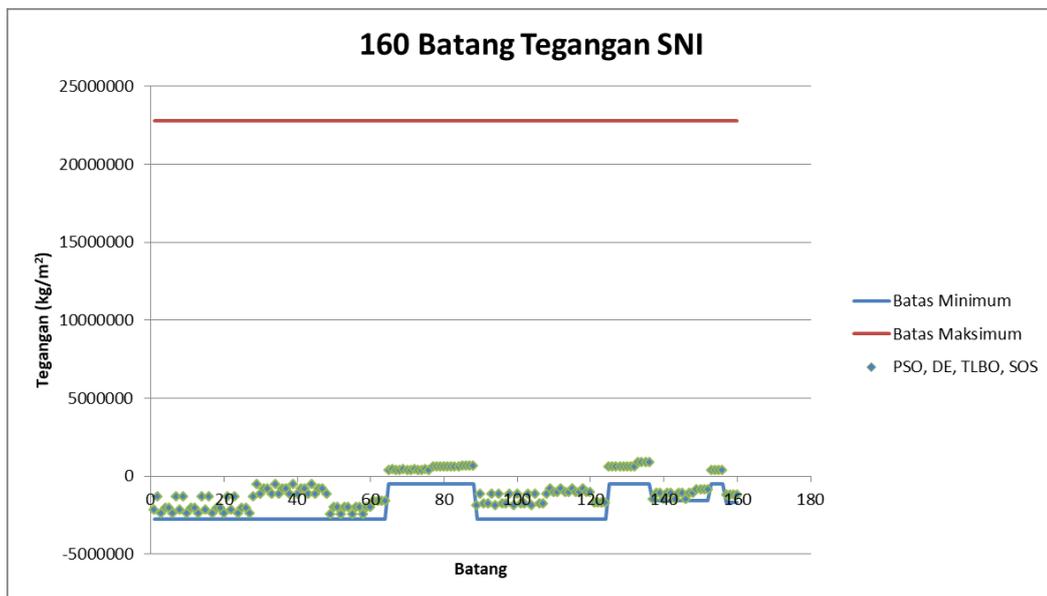
Tabel 3 Profil hasil optimasi desain rangka batang piramida 160 batang

Luas* (mm ²)	SOS	PSO	DE	TLBO	CS
A1	432	432	432	432	690
A2	161	161	161	161	690
A3	432	432	432	432	690
A4	161	161	161	161	690
A5	412	412	412	412	690
A6	161	161	161	161	690
A7	319	319	319	319	690

*Hasil terbaik dari 30 kali penjalanan program

Tabel 4 Statistik berat hasil optimasi desain rangka batang piramida 160 batang

Berat (kg)	SOS	PSO	DE	TLBO	CS
Terbaik	1590	1590	1590	1590	3119
Rata-rata	1590	4045	1590	1598	-
Deviasi standar	0	2866	0	24	-
Koefisien variasi (%)	0	70.86	0	1.50	-
Jumlah run yang berhasil*	30	30	30	30	-



Gambar 5 Tegangan pada setiap batang dan batas kekuatan desainnya untuk penampang-penampang terbaik hasil optimasi pada rangka batang piramida 160 batang

5. KESIMPULAN

Algoritma metaheuristik SOS telah diterapkan untuk mengoptimasi ukuran penampang dari dua rangka batang baja yang cukup besar, yakni struktur kubah 120 batang dan piramida 160 batang. Sebagai pembandingan, algoritma-algoritma metaheuristik *particle swarm optimization*, *differential evolution*, dan *teaching-learning-based optimization* dan suatu *commercial software* juga digunakan dalam mengoptimasi struktur. Hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan kinerja algoritma SOS yang lebih baik dari metode-metode pembandingan, baik dari segi akurasi maupun konsistensi. Dengan demikian, algoritma SOS merupakan metode alternatif yang baik untuk menyelesaikan masalah optimasi struktur rangka batang dalam praktek desain.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. Manual of Steel Construction-Allowable Stress Design (1989). USA.
 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>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). New optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43.
- Ezugwu, A. E., & Prayogo, D. (2019). Symbiotic Organisms Search Algorithm: theory, recent advances and applications. *Expert Systems with Applications*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.10.045>
- Flager, F., Soremekun, G., Adya, A., Shea, K., Haymaker, J., & Fischer, M. (2014). Fully Constrained Design: A general and scalable method for discrete member sizing optimization of steel truss structures. *Computers and Structures*, 140, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.05.002>
- Hasançebi, O., Çarbas, S., & Saka, M. P. (2011). A reformulation of the ant colony optimization algorithm for large scale structural optimization. *Civil-Comp Proceedings*, 97. <https://doi.org/10.4203/ccp.97.12>
- Jiang, C., Tang, C., Seidel, H. P., & Wonka, P. (2017). Design and volume optimization of space structures. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4). <https://doi.org/10.1145/3072959.3073619>
- Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2014). Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method. *Computers and Structures*, 139, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.04.005>
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2009). Size optimization of space trusses using Big Bang-Big Crunch algorithm. *Computers and Structures*, 87(17–18), 1129–1140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.04.011>
- Prayogo, D., Cheng, M. Y., & 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. <https://doi.org/10.9744/ced.19.1.36-43>
- Prayogo, D., Wong, F. T., Gunawan, R., Ali, S. K., & Sugianto, S. (2018). Optimasi Ukuran Penampang Rangka Batang Baja Berdasarkan SNI 1729:2015 dengan Metode Metaheuristik Symbiotic Organisms Search. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 25(1), 41–52. <https://doi.org/10.5614/jts.2018.25.1.6>
- Prayogo, D., Wong, F. T., & Sugianto, S. (2018). Enhanced symbiotic organisms search (ESOS) for global numerical optimization. *Proceeding - ICAMIMIA 2017: International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation*, 69–73. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2017.8387560>
- Rajeev, S., & Krishnamoorthy, C. S. (1992). Discrete Optimization of Structures using Genetic Algorithms. *October*, 118(5), 1233–1250.
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *CAD Computer Aided Design*, 43(3), 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>
- SNI 1729:2015. Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural (2015). Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- Soh, C. K., & Yang, J. (1996). Fuzzy controlled genetic algorithm search for shape optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 10(2), 143–150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1996\)10:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1996)10:2(143))
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution- A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341–359. <https://doi.org/10.1071/AP09004>