

OPTIMASI DESAIN STRUKTUR PORTAL BAJA DENGAN METODE METAHEURISTIK

Giannina Allan Tjiptarahardja¹, Wong Foek Tjong², dan Doddy Prayogo³

ABSTRAK: Studi ini menelusuri performa algoritma metaheuristik dalam mengoptimasi struktur portal baja. 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 berupa portal 1 bentang 8 lantai, 2 bentang 3 lantai dan 3 bentang 15 lantai. 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, AISC 2001 (*LRFD Specification for Structural Steel Buildings*). Hasil eksperimen yang didapat menunjukkan bahwa SOS adalah algoritma yang paling bisa diandalkan dalam mengoptimasi struktur berskala besar. SOS meraih standard deviasi terendah dan konvergensi tercepat untuk semua struktur yang ditinjau. Namun DE adalah algoritma yang paling efisien dalam meraih berat struktur minimum.

KATA KUNCI: metaheuristik, optimasi, portal baja, AISC 2001 (*LRFD Specification for Structural Steel Buildings*)

1. PENDAHULUAN

Optimasi struktur adalah proses memperkecil berat atau biaya struktur seminimal mungkin tanpa melampaui batasan-batasan yang ada dalam peraturan. Perkembangan dari struktur portal dalam dunia konstruksi telah meningkat secara pesat, sehingga diperlukan adanya upaya untuk memanfaatkan waktu, sumber daya dan biaya dalam mendesain secara efisien. Lebih lanjut lagi, banyaknya variabel desain dan faktor pembatas membuat proses optimasi semakin susah untuk dilakukan dalam jangka waktu yang singkat. Untuk menanggulangi masalah tersebut, para peneliti mulai mengembangkan berbagai macam algoritma metaheuristik sebagai salah satu metode alternatif untuk mengoptimasi struktur. Dengan adanya metode optimasi membuka peluang bagi peneliti untuk memperoleh efisiensi bahan dan biaya dari struktur secara 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).

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, giannina.allan@gmail.com

² Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, wftjong@peter.petra.ac.id

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

Namun, dengan meningkatnya kompleksitas dan jumlah elemen pada suatu struktur portal, dibutuhkan metode optimasi yang lebih efisien. Hal ini menyebabkan diperlukannya penelitian lebih lanjut terhadap optimasi struktur portal. Penelitian tentang optimasi telah dilakukan pada berbagai macam struktur portal, diantaranya adalah struktur portal baja dengan 1 bentang dan 8 lantai, 2 bentang dan 3 lantai, 3 bentang dan 15 lantai seperti yang ada dalam Talatahari *et al.* (2015) dan Maheri dan Narimani (2014).

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 literatur. Tahap analisa struktur dan optimasi algoritma metaheuristik dilakukan dalam program MATLAB R2015a. Tahap optimasi akan menghasilkan luas penampang setiap elemen dan berat total struktur yang dijadikan fungsi objektif (*objective function*). Hasil dari setiap algoritma metaheuristik ditabulasi dan dibandingkan satu sama lain.

4. HASIL DAN DISKUSI

Struktur portal 2 bentang dan 3 lantai ini pertama kali dioptimasi oleh Hall S.K. et al (1989). Maheri and Narimani (2014) juga mengoptimasi berat dari struktur tersebut dan hasil penelitiannya digunakan sebagai pembanding dengan hasil penelitian yang telah dilakukan. Bentuk dan konfigurasi dari model struktur portal 2 bentang dan 3 lantai dapat dilihat pada **Gambar 1**. Berikut adalah properti material dan batasan (*constraints*) pada struktur tersebut:

a. Properti material

$$\rho = 7861 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 29,000 \text{ ksi (200,000 MPa)}$$

$$F_y = 36,0 \text{ ksi (248,2 MPa)}$$

b. Batasan (*constraints*)

Berdasarkan peraturan menurut AISC 2001 dan LRFD edisi 3rd.

Penampang *discrete* kolom dibatasi hanya menggunakan W10

G1: Momen lentur leleh ijin

$$M_n = 0.9 Z_x f_y \text{ untuk batang yang penampang kompak.}$$

$$M_n = 0.9 \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \text{ untuk batang yang penampang tidak kompak.}$$

$$M_n = 0.9 f_{cr} S_x \text{ untuk batang yang penampang langsing.}$$

G2: Momen tekuk lateral torsi ijin

Untuk balok diasumsi $C_b=1$

$$M_n = 0.9 Z_x f_y \text{ untuk batang yang penampang kompak.}$$

$$M_n = 0.9 C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \text{ untuk batang yang penampang tidak kompak.}$$

$$M_n = 0.9 C_b \left[\frac{\pi}{L_b} \sqrt{E I_y G J + \left(\pi \frac{E}{L_b} \right)^2 I_y I_w} \right] \text{ untuk batang yang penampang langsing.}$$

G3: Aksial tekan ijin

$$P_n = 0.85 f_{cr} A_g$$

G4: Aksial tarik ijin

Diambil nilai terkecil dari :

$$P_{n1} = 0.9 f_{cr} A_g$$

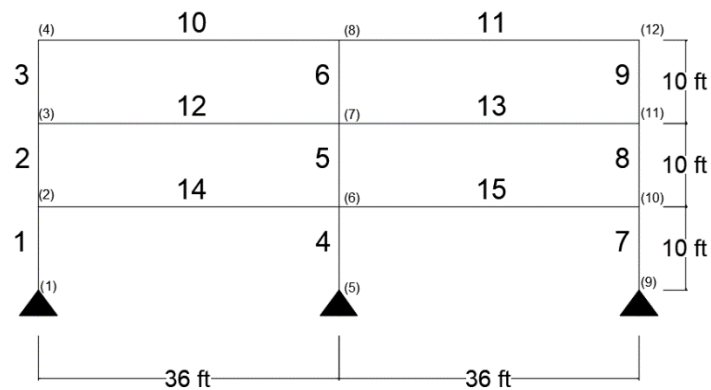
$$P_{n2} = 0.75 f_u A_g$$

G5: Rumus interaksi

$$\frac{Nu}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mu_x}{\phi b M_{n_x}} + \frac{Mu_y}{\phi b M_{n_y}} \right) \leq 1 \quad \text{untuk } \frac{Nu}{\phi N_n} \geq 0.2$$

$$\frac{Nu}{2\phi N_n} + \left(\frac{Mu_x}{\phi b M_{n_x}} + \frac{Mu_y}{\phi b M_{n_y}} \right) \leq 1 \quad \text{untuk } \frac{Nu}{\phi N_n} < 0.2$$

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, dan A_i adalah luas penampang.



Gambar 1. Tampak Samping Struktur Portal 2 Bentang 3 Lantai

Struktur portal 2 bentang 3 lantai ini kemudian diberi beban merata pada seluruh baloknya sebesar - 12.4544 kN/ft dan beban horizontal ke kanan untuk node 2, 3 dan 4. Pembebanannya adalah sebagai berikut:

Struktur portal 1 bentang 8 lantai ini kemudian diberi beban vertikal sebesar -444.8 kN untuk seluruh

- Node 2 : 22.24 kN
- Node 3 : 22.24 kN
- Node 4 : 11.12 kN

Struktur ini menggunakan discrete variables, sehingga luas penampang adalah berdasarkan tabel profil baja W menurut AISC 2001 dan LRFD edisi 3rd. Maheri dan Narimani (2014) menggunakan algoritma *enhanced harmony search algorithm* (EHS), dimana hasil optimasi yang didapatkan adalah 18,000 lb (8164.66 kg). Perbandingan hasil optimasi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Optimasi Portal 2 Bentang dan 3 Lantai

Variables		EHS Mahmoud R. and M.M Narimani, (2014)	PSO	DE	TLBO	SOS
A1	mm2 (in2)	10451.59 (16.2)	8580.63 (13.3)	8580.63 (13.3)	8580.63 (13.3)	8580.63 (13.3)
A2	mm2 (in2)	12903.2 (20)	12903.2 (20)	12903.2 (20)	12903.2 (20)	12903.2 (20)
Best	kg (lb)	8164.66 (18000)	8528.31 (18804.93)	8528.31 (18804.93)	8528.31 (18804.93)	8528.31 (18804.93)
Average	kg (lb)	- -	12761.40 (28138.89)	15250.80 (33628.00)	8528.31 (18804.93)	8528.31 (18804.93)
Standard Deviasi	kg (lb)	114.17 251.7	12946.84 (28547.78)	19386.82 (42747.95)	0 (0)	0 (0)
CoV (%)		-	101.45	127.12	0	0
Jumlah Run yang Berhasil		30	30	27*	23*	30
No. FE		-	50000	50000	50000	50000
Waktu (detik)		-	20877.43	5788.52	5496.21	5548.41

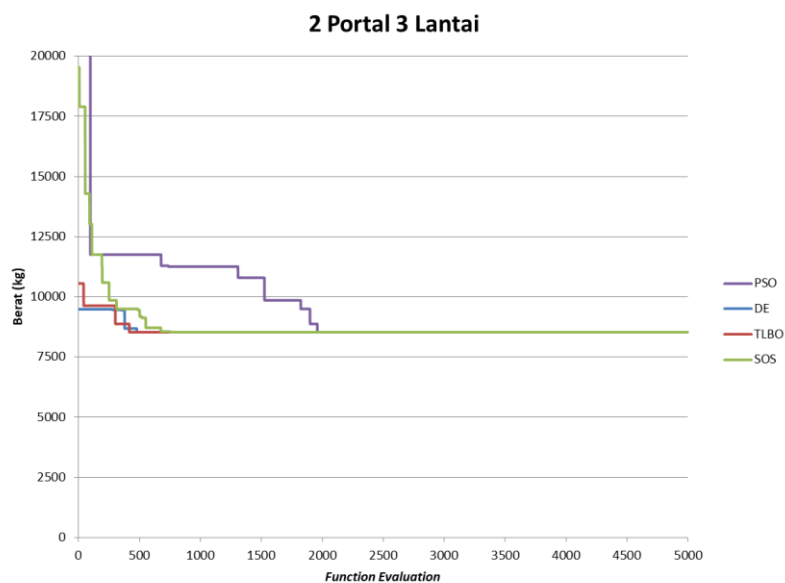
* Metode optimasi ini hanya mampu menghasilkan kurang dari 30 hasil karena beberapa hasil melanggar batasan-batasan yang sudah ditentukan.

Terlihat dari **Tabel 1** bahwa semua algoritma mendapatkan hasil optimasi yang sama, yaitu 8528.31 kg. Sedangkan hasil optimasi dari Maheri dan Narimani (2014) meraih berat optimal 8164.66 kg. Ada selisih 363.65 kg yang disebabkan oleh perbedaan formula perhitungan berat yang dipakai. Literatur

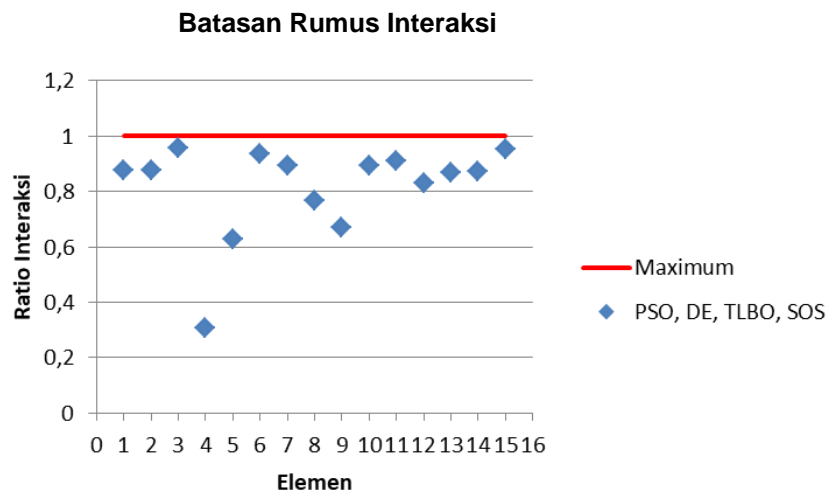
tidak menghitung berat struktur dengan formula Massa dan Volum. Perbedaan tersebut pasti disebabkan oleh perbedaan formula berat baja karena hasil optimasi literatur untuk luas penampang A2 menunjukkan nilai yang sama dan luas penampang A1 yang lebih berat diantara algoritma lainnya. Sehingga bila luas penampang literatur dihitung dengan formula Massa dan Volum, beratnya adalah 8931.77 kg, yaitu lebih berat 403.46 kg dibandingkan hasil optimasi dari penelitian. Selain itu, hasil dari literatur memiliki jumlah iterasi yang sedikit yaitu antara 300-400 iterasi dibandingkan jumlah iterasi dari penelitian, sehingga standard deviasinya tinggi sebesar 114.17 kg dan lebih tidak seragam.

SOS terbukti sangat akurat dan konsisten karena *coefficient of variation* (CoV) 0%. Yang artinya selama 30 kali mengoptimasi, hasil optimum yang dicapai sama semua. Algoritma TLBO dapat mencapai berat optimal yang sama namun ada 7 buah hasil yang melanggar batasan *constraint* dari 30 hasil. **Gambar 2** menunjukkan pola konvergensi dari keempat algoritma yang digunakan dalam penelitian ini. Namun pola menunjukkan hasil telah mencapai optimal pada iterasi kurang dari 5000 sehingga tidak diperlukan iterasi sebanyak 50000.

Gambar 3 menunjukkan hasil nilai rumus interaksi yang terjadi dan pola dari batasannya. Karena keempat algoritma menghasilkan penampang yang sama maka *displacement* dan nilai rumus interaksinya juga sama. Dapat dilihat dari **Gambar 3** bahwa batang nomor 15 memiliki nilai rumus interaksi yang maksimum diantara elemen lainnya yaitu mendekati nilai 1.



Gambar 2. Perbandingan Konvergensi 2 Bentang 3 Lantai



Gambar 3. Hasil Rumus Interaksi untuk Setiap Elemen dalam 2 Portal 3 Lantai

5. KESIMPULAN

Penelitian ini dapat menyimpulkan beberapa hal mengenai algoritma metaheuristik dalam mengoptimasi portal baja. Kesimpulan-kesimpulan tersebut meliputi:

1. SOS merupakan algoritma metaheuristik yang paling dapat diandalkan karena menghasilkan berat struktur minimum dengan standard deviasi yang kecil. Hal ini dibuktikan pada semua tipe struktur portal. Pada struktur portal 1 bentang 8 lantai dan 3 bentang 15 lantai, DE dapat memberi hasil yang lebih baik dari SOS. Namun hasil tersebut juga tidak jauh berbeda. Dapat disimpulkan bahwa SOS merupakan algoritma metaheuristik yang cocok untuk mengoptimasi struktur berskala besar.
2. PSO tidak dapat menghasilkan berat yang optimal pada struktur portal 1 bentang 8 lantai dan 3 bentang 15 lantai. PSO juga sukar untuk mendapatkan berat yang optimal tanpa melebihi batasan-batasan yang ada. Hasil dari PSO juga sangat bervariasi sehingga tidak dapat diandalkan.
3. DE memiliki potensi dalam mengoptimasi struktur portal. Hal ini terbukti pada semua tipe struktur portal. Hasil optimasi DE pada struktur tersebut merupakan yang paling ringan diantara algoritma lainnya namun dengan standard deviasi yang cukup besar.
4. TLBO terlihat sebagai algoritma yang lebih bagus dari PSO dan DE namun tidak lebih bagus dari SOS. TLBO mampu memberi berat optimal yang hampir sama dengan DE namun dengan standard deviasi yang jauh lebih kecil. Performa TLBO terlihat relatif sama pada ketiga struktur, hasil TLBO tidak pernah terjelek namun juga tidak pernah terbaik.

AISC 2001 (*LRFD Specification for Structural Steel Buildings*) menentukan banyak batasan, diantaranya aksial, momen lentur leleh dan tekuk-torsi lateral, dan rumus interaksi sehingga optimasi yang dilakukan pada program membutuhkan waktu *running time* yang cukup lama. Semua algoritma terlihat dapat meraih berat yang jauh lebih ringan dan hasil optimasi lebih seragam pada seluruh struktur.

6. SARAN

Satu bagian penelitian ini yang tidak dapat diselesaikan tepat waktu adalah bagian memperhitungkan nilai C_b untuk balok, penelitian menggunakan asumsi $C_b=1$. Hal ini disebabkan karena perhitungan diagram momen dengan persamaan kuadrat akibat beban yang assimetris membutuhkan waktu pemrograman MATLAB yang lebih sukar dan lama dibandingkan diagram momen linier pada kolom. Selain itu, perlu dilakukan *discretizing* elemen yang lebih banyak agar dapat ditemukan nilai momen yang ultimit pada balok. Sedangkan penelitian ini hanya *discretizing* elemen balok di tengah saja.

Penelitian yang juga dapat dilakukan adalah optimasi topologi dari struktur portal. Diperlukan algoritma yang lebih kompleks dan juga kekuatan komputasi yang lebih besar untuk melakukan hal ini. Saran yang terakhir adalah faktor panjang efektif (K) lebih baik dihitung menggunakan nomogram pada AISC 2001 (*LRFD Specification for Structural Steel Buildings*) dibandingkan formula Dumonteil karena formula tersebut memiliki ketidak-akuratan sebesar -1% sampai +2%.

7.

DAFTAR REFERENSI

- American Institute of Steel Construction (2001). *Manual Of Steel Construction—Load Resistance Factor Design*, 3rd ed.. Chicago: AISC; 2001.
- 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.
- Dumonteil P. (1992) Simple Equations For Effective Length Factors. *Eng J*, AISC 1992;29(3):111–5.
- 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.
- Hall, S. K., Cameron, G. E. and Grierson, D. E. (1989). "Least Weight Design of Steel Frameworks Accounting for P-Δ Effects." *Journal of Structural Engineering* 115(6): 1463-1475.
- Maheri, M. R. and Narimani, M. M. (2014). "An Enhanced Harmony Search Algorithm For Optimum Design Of Side Sway Steel Frames." *Computers & Structures* 136: 78-89.
- 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., Sivasani, 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.
- 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.
- Talatahari, S., Gandomi, A. H., Yang, X.-S. and Deb, S. (2015). "Optimum Design Of Frame Structures Using The Eagle Strategy With Differential Evolution." *Engineering Structures* 91: 16-25.
- 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.