

OPTIMASI *ECCENTRICALLY-BRACED FRAMES* (EBF) DENGAN METODE METAHEURISTIK

Denalyn Tanist Istanto¹, Christiana², Doddy Prayogo³, dan Hasan Santoso⁴

ABSTRAK : *Eccentrically-braced frames* (EBF) adalah struktur baja penahan beban lateral yang memiliki cukup banyak kelebihan. Namun, proses desain EBF tergolong rumit karena selain memiliki banyak opsi profil yang dapat digunakan untuk elemen-elemennya, terdapat banyak syarat desain struktural yang harus dipenuhi. Pemanfaatan metode metaheuristik dapat menjadi solusi untuk mengurangi proses *trial-and-error* yang biasanya dilakukan oleh para insinyur, sekaligus menghasilkan desain struktur yang paling ringan. Studi ini bertujuan untuk membandingkan performa algoritma optimasi SOS dan DE dalam melakukan optimasi struktur EBF 2 dimensi dengan studi kasus bangunan kantor 3 lantai. Struktur menerima beban hidup, beban mati, dan beban lateral gempa yang proporsional dengan berat strukturnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma SOS dan DE dapat menyelesaikan permasalahan optimasi struktur EBF 2 dimensi. Namun dari analisis statistik yang dilakukan berupa nilai rata-rata, nilai terbaik dan terburuk, juga standar deviasi dari 10 kali percobaan, dapat disimpulkan bahwa algoritma SOS memiliki performa yang lebih baik dibandingkan DE.

KATA KUNCI : optimasi, metaheuristik, SOS, DE, *eccentrically-braced frames*.

1. PENDAHULUAN

Struktur *eccentrically-braced frames* (EBF) adalah struktur baja yang menahan beban lateral melalui kombinasi struktur rangka dan *truss*. Pada EBF, minimal salah satu ujung *bracing* berpotongan dengan balok membentuk eksentrisitas horizontal tertentu dari *joint* (AISC, 2016). Bagian balok yang berpotongan dengan *bracing* disebut elemen *link*, dan elemen ini yang ditetapkan sebagai *fuse* yang akan mengalami performa inelastis selama elemen lainnya tetap elastis. EBF dikenal sebagai struktur *hybrid* yang menggabungkan kelebihan dari *moment-resisting frames* (MRF) dan *concentrically-braced frames* (CBF), yaitu memiliki kekakuan elastis dan daktilitas yang baik (Engelhardt & Popov, 1989). EBF juga banyak disukai dari segi arsitektural karena dapat menyediakan banyak *opening/ruang* (Azad & Topkaya, 2017).

Mendesain EBF yang kuat sekaligus efisien memiliki tantangan tersendiri, karena banyaknya opsi penggunaan profil baja yang dapat digunakan, sekaligus posisi penempatan *bracing* yang beragam dalam satu portal. Ini membuat para insinyur lebih sering melakukan *trial-and-error* dan mengandalkan pengalaman dalam mendesain struktur (Liang et al., 2000). Ditambah lagi, profil baja yang tersedia memiliki batasan sesuai produk yang dibuat di pabrik. Oleh karena itu, pemanfaatan metode metaheuristik untuk mengeksplor profil yang dapat digunakan untuk struktur EBF dapat menghemat waktu karena proses *trial-and-error* dilakukan oleh komputer. Penggunaan metode metaheuristik juga memungkinkan untuk menghasilkan desain yang paling optimal dari segi berat struktur, namun masih memenuhi persyaratan struktural yang ada.

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, b11170107@john.petra.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, b11170159@john.petra.ac.id

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

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

Metode metaheuristik sudah beberapa kali digunakan untuk melakukan optimasi pada *braced frames*, misalnya yang dilakukan oleh Kaveh & Farhoudi (2016) dan Carbas (2016). Namun, penelitian lebih sering dilakukan terhadap CBF, sedangkan untuk EBF masih sangat jarang ditemui. Mempertimbangkan kelebihan yang dimiliki EBF, maka perlu dilakukan penelitian untuk memanfaatkan metode metaheuristik ini dalam desain struktur EBF.

2. LANDASAN TEORI

Pada sistem struktur EBF, perilaku inelastis direncanakan terjadi hanya pada elemen *link* yang berada di antara dua *bracing* eksentris. Bagian balok, kolom dan *bracing* direncanakan tetap elastis selama beban seismic bekerja (Daneshmand & Hashemi, 2012). Untuk memastikan ini terjadi, desain EBF menggunakan konsep *capacity design* di mana elemen *link* didesain berdasarkan beban gempa yang terjadi, sedangkan elemen lainnya didesain berdasarkan kapasitas *link* yang mengalami leleh dan *strain-hardening* (Engelhardt & Popov, 1989). *Capacity design* dilakukan dengan memeriksa kapasitas profil terhadap beban yang terjadi pada ujung-ujung *link* akibat pelelehan *link*. Panjang *link* menjadi faktor yang penting dalam menentukan performa EBF, dan *short link* merupakan tipe *link* yang paling baik dalam memecah energi gempa (Kasai & Popov, 1986).

2.1. Formulasi Optimasi Desain EBF

Dalam proses optimasi struktur EBF, terdapat 3 variabel utama yang akan dioptimasi, yaitu profil kolom, profil balok, dan profil *bracing*. 3 variabel ini berupa variabel diskret berdasarkan profil baja yang diproduksi oleh pabrik. Untuk balok dan kolom digunakan profil WF dan *bracing* menggunakan profil HSS. Berdasarkan AISC 341-16, dalam mendesain EBF, elemen balok, kolom, dan *bracing* harus mengikuti syarat kelangsingan, disajikan pada **Tabel 1**. Berdasarkan batasan ini, maka profil-profil yang tersedia pada tabel profil Gunawan & Morisco (1988) dan tabel profil AISC (2016) dapat diseleksi dan hanya yang memenuhi syarat saja yang dapat digunakan sebagai opsi desain.

Tabel 1. Syarat Kelangsingan Elemen

Elemen	λ_{hd}	λ_{md}
Sayap profil WF	$0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0.4 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
Badan profil WF	$1.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$1.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
Profil HSS	$0.65 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0.76 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
b/t dan h/tw $\leq \lambda_{hd}$ untuk <i>high ductile members</i> (kolom) b/t dan h/tw $\leq \lambda_{md}$ untuk <i>moderately ductile members</i> (balok dan <i>bracing</i>)		

Dengan adanya syarat ini, maka jumlah profil yang dapat menjadi opsi desain menjadi 17 profil untuk kolom, 30 profil untuk balok, dan 55 profil untuk *bracing*.

3 variabel utama yang akan dioptimasi dibagi kembali sesuai jumlah pengelompokan elemen kolom, balok dan *bracing*. Ilustrasi nilai variabel yang dapat dihasilkan oleh algoritma optimasi disajikan dalam **Tabel 2**. Variabel K_j , B_k dan S_l masing-masing menggambarkan nomor indeks profil yang digunakan untuk tiap kelompok elemen. Misalnya, variabel K_1 bernilai 10, berarti untuk elemen kolom kelompok 1 menggunakan profil nomor 1 pada tabel profil. Nilai 0 pada variabel *bracing* berarti tidak ada elemen *bracing* yang digunakan. Notasi j , k , l menunjukkan kolom ke- j , balok ke- k , dan *bracing* ke- l .

Tabel 2. Ilustrasi Variabel Optimasi

K_1	K_2	K_3	...	K_j	B_1	B_2	B_3	...	B_k	S_1	S_2	S_3	...	S_l
10	10	7	...	4	5	3	2	...	1	0	2	0	...	6

Selain variabel optimasi di atas, terdapat beberapa parameter lainnya yang akan dimasukkan dalam desain, seperti *material properties* dari baja, seperti modulus elastisitas (E), modulus geser (G) dan berat jenis (γ), juga *properties* dari penampang profil, seperti luas (A) dan momen inersia (I).

Untuk membatasi unsur acak dalam optimasi, maka ditentukan batas atas dan batas bawah ruang pencarian mengikuti **Tabel 3**. Batas atas dan bawah ini diambil berdasarkan nomor indeks profil yang dapat digunakan.

Tabel 3. Batas Atas dan Batas Bawah untuk Variabel Desain

Elemen	Batas Atas	Batas Bawah
Kolom	17	1
Balok	30	1
Bracing	55	0

Dalam optimasi desain struktur EBF, dibutuhkan *constraints* atau batasan untuk memastikan desain yang dihasilkan tetap memenuhi persyaratan struktural yang berlaku. Batasan-batasan yang digunakan dalam optimasi disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Constraints yang Digunakan

Constraint	Persyaratan Desain	Acuan
$g_1(x)$	Simpangan antar-lantai	SNI 1726:2019 Tabel 20
$g_2(x)$	Stabilitas	SNI 1726:2019 Ps. 7.8.7
$g_3(x)$	Kapasitas profil	SNI 1729:2020 Bab D2, E1, E3, E4, F1, F2, G
$g_4(x)$	Rumus interaksi	SNI 1729:2020 Bab H1
$g_5(x)$	Capacity design	AISC 341-16 Commentary Bab F3
$g_6(x)$	Jumlah bracing minimum pada tiap lantai	-

Hasil yang diinginkan dalam optimasi struktur EBF adalah berat struktur yang paling ringan, sehingga *objective function* yang digunakan adalah berat struktur. Apabila ada hasil optimasi yang melanggar *constraint*, ditambahkan *penalty function* berupa sebuah angka yang sangat besar pada *objective value*, sehingga hasil optimasi tersebut tidak menjadi solusi paling optimal.

2.2. Symbiotic Organisms Search (SOS)

SOS merupakan metode optimasi iteratif yang berdasarkan pada interaksi simbiotik organisme berpasangan, dan pertama kali diperkenalkan oleh Cheng & Prayogo (2014). Dalam algoritma ini, terdapat 3 fase simbiosis, yaitu mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Setiap organisme akan melewati 3 fase ini dan di akhir proses, organisme yang terbaik akan keluar menjadi solusi.

2.3. Differential Equation (DE)

DE merupakan algoritma optimasi sederhana yang berbasis *evolutionary algorithm* (EA) dan pertama kali diperkenalkan oleh Storn & Price (1997). Dalam algoritma ini, setiap individu dalam populasi akan mengalami evolusi. Terdapat 3 tahap penting dalam algoritma DE, yaitu *mutation*, *crossover*, dan *selection*. Setelah melewati ketiga tahap ini, populasi terbaik akan keluar menjadi solusi.

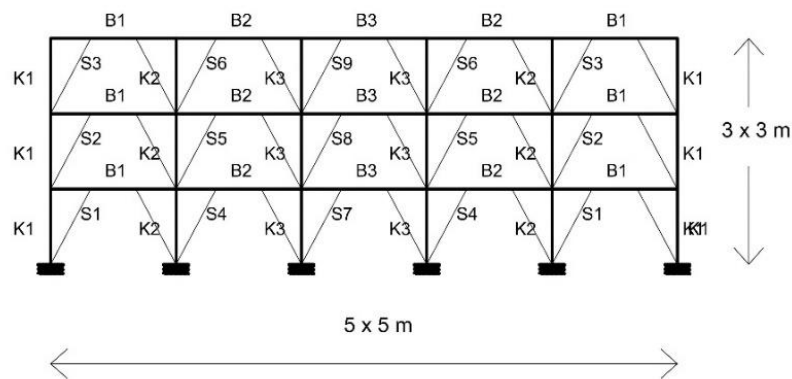
3. METODOLOGI PENELITIAN

Terdapat beberapa langkah utama yang dilakukan pada penelitian ini. Pertama, algoritma akan menghasilkan nilai variabel acak berupa profil baja yang akan digunakan untuk tiap kelompok elemen struktur EBF. Dari profil yang didapatkan, dilakukan analisis struktur menggunakan *direct stiffness method* (DSM), perhitungan *objective value* berupa berat struktur dan hasil analisis diperiksa terhadap seluruh *constraints* yang ada. Setiap algoritma dijalankan sebanyak 1000 iterasi menggunakan 100 populasi. Setelah 1000 kali iterasi, didapatkan berat struktur yang paling ringan. Proses ini dilakukan menggunakan algoritma SOS dan DE sebanyak 10 kali, kemudian dilakukan analisis statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata, nilai terbaik dan terburuk, serta standar deviasi dari masing-masing algoritma.

Studi kasus yang digunakan untuk penelitian ini adalah bangunan kantor 3 lantai dan 5 bentang. Tinggi antar-lantai digunakan sebesar 3 meter dan bentang sebesar 5 meter. Diasumsikan bentang ke arah tegak lurus struktur adalah 5 meter, dan portal 2 dimensi yang ditinjau adalah portal interior. Beban yang diterima oleh struktur meliputi beban mati, yaitu berat sendiri elemen dan beban mati tambahan 1 kN/m^2 , beban hidup 2.4 kN/m^2 berdasarkan SNI 1727:2020, dan beban gempa proporsional terhadap berat struktur menggunakan metode statik ekuivalen berdasarkan SNI 1726:2019.

4. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 1 menunjukkan penomoran kelompok elemen untuk balok, kolom dan *bracing* pada studi kasus bangunan kantor 3 lantai. Elemen kolom dan balok dikelompokkan setiap 3 lantai dan dibuat sama untuk bentang di seberangnya. Misalnya kolom pada bentang 1 akan sama dengan bentang 5, demikian seterusnya. Sedangkan untuk elemen *bracing* tidak dikelompokkan berdasarkan lantai dan hanya dikelompokkan berdasarkan bentang saja.



Gambar 1. Penomoran Kelompok untuk Kolom (K), Balok (B) dan Bracing (S)

Optimasi dilakukan menggunakan variabel diskret berupa nomor indeks profil berdasarkan tabel profil Gunawan & Morisco (1988) untuk profil WF dan tabel profil AISC (2016) untuk profil HSS. Perbandingan hasil optimasi algoritma SOS dan DE disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Optimasi Struktur EBF 3 Lantai dan 5 Bentang 2 Dimensi

Variabel	SOS	DE
K1	16 (WF100.100.6.8)	7 (WF300.200.9.14)
K2	6 (WF350.350.19.19)	4 (400.400.18.28)
K3	6 (WF350.350.19.19)	6 (WF350.350.19.19)
B1	15 (WF250.175.7.11)	14 (WF250.250.9.14)
B2	1 (WF450.300.11.18)	5 (WF400.400.18.28)
B3	16 (WF200.200.10.16)	7 (WF350.350.14.22)
S1	0	0
S2	0	0
S3	0	0
S4	0	0
S5	0	0
S6	0	0
S7	15 (HSS8.8.1/2)	13 (HSS9.9.1/2)
S8	26 (HSS5.5.5.5/16)	18 (HSS7.7.1/2)
S9	26 (HSS5.5.5.5/16)	16 (HSS8.8.3/8)
Nilai terbaik (kN)	103.0376	103.0375
Nilai terburuk (kN)	137.7655	178.5916
Median (kN)	104.2838	104.2838
Rata-rata (kN)	107.5167	126.3675
Standar deviasi (kN)	10.6532	35.8472

Dari **Tabel 5**, dapat dilihat bahwa baik algoritma SOS maupun DE berhasil menemukan berat struktur paling ringan yang sama, yaitu sebesar 103.0376 kN. Dari rata-rata 10 kali percobaan, didapati SOS memiliki rata-rata yang lebih baik, yaitu sebesar 107.5167 kN dan standar deviasi sebesar 10.6532 kN, di saat DE memiliki rata-rata sebesar 126.3675 kN dan standar deviasi sebesar 35.8472 kN. Meski mendapatkan nilai terbaik yang sama, nilai terburuk yang didapatkan SOS sebesar 137.7655 kN, lebih ringan dibandingkan nilai terburuk yang didapatkan DE yaitu sebesar 178.5916 kN.

Apabila ditinjau dari segi penempatan *bracing*, maka kedua algoritma menghasilkan konfigurasi yang sama, yaitu *bracing* dipasang pada kelompok S7, S8 dan S9.

Berdasarkan perbandingan di atas, dapat dilihat bahwa SOS lebih unggul dibandingkan DE dalam menyelesaikan permasalahan optimasi struktur EBF. Hal ini dapat dilihat dari nilai rata-rata dan standar deviasi SOS yang lebih baik dibandingkan DE. Standar deviasi yang lebih baik menandakan bahwa dari 10 kali percobaan, hasil dari SOS lebih seragam dibandingkan DE. Selain itu, rata-rata yang lebih baik menandakan bahwa dari 10 kali percobaan SOS lebih banyak menghasilkan berat struktur yang lebih ringan daripada DE.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Baik SOS maupun DE dapat menyelesaikan permasalahan optimasi struktur EBF 2 dimensi. Hal ini ditunjukkan dari 10 kali percobaan yang seluruhnya berhasil mendapatkan konfigurasi profil kolom, balok dan *bracing* yang tidak melanggar *constraints*.
2. SOS lebih unggul dibandingkan DE dalam menyelesaikan permasalahan optimasi struktur EBF 2 dimensi. Hal ini dibuktikan dengan nilai rata-rata dan standar deviasi dari hasil SOS yang lebih baik dibandingkan DE. SOS menghasilkan berat struktur yang lebih seragam dan lebih ringan dibandingkan DE.

Beberapa saran untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

1. Dalam penelitian ini, digunakan penyederhanaan penggunaan nilai $C_b = 1$ untuk balok dan kolom. Perhitungan C_b dapat dilakukan lebih akurat dengan melakukan penambahan titik nodal pada elemen balok dan kolom saat analisis *direct stiffness method*.
2. Hasil optimasi struktur dapat diteliti lebih lanjut dengan melakukan pemeriksaan terhadap perilaku inelastisnya dengan menggunakan *software* seperti SAP2000 atau ETABS.

6. DAFTAR REFERENSI

- AISC. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- AISC. (2018). *ASTM A1085 Square HSS Dimensions and Properties*, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- Azad, S. K. & Topkaya, C. (2017). "A Review of Research on Steel Eccentrically Braced Frames." *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 128, 53-73.
- Carbas, S. (2016). "Design Optimization of Steel Frames Using An Enhanced Firefly Algorithm." *Engineering Optimization*. Vol. 48, No. 12, 2007-2025.
- Cheng, M. Y. & Prayogo, D. (2014). "Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm." *Computers & Structures*. Vol. 139, 98-112.
- Daneshmand, A. & Hashemi, B. H. (2012). "Performance of Intermediate and Long Links in Eccentrically Braced Frames." *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 70, 167-176.
- Engelhardt, M. D. & Popov, E. P. (1989). "On Design of Eccentrically Braced Frames." *Earthquake Spectra*. Vol. 5, No. 3, 495-511.
- Gunawan, R. & Morisco, I. (1988). *Tabel Profil Konstruksi Baja*, Kanisius, Yogyakarta, Indonesia.
- Kasai, K. & Popov, E. P. (1986). *A Study of Seismically Resistant Eccentrically Braced Steel Frame Systems*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Kaveh, A. & Farhoudi, N. (2016). "Dolphin Monitoring for Enhancing Metaheuristic Algorithms: Layout Optimization of Braced Frames." *Computers & Structures*. Vol. 165, 1-9.
- Liang, Q. Q., Xie, Y. M., & Steven, G. P. (2000). "Optimal Topology Design of Bracing Systems for Multistory Steel Frames." *Journal of Structural Engineering*. Vol. 126, No. 7, 823-829.
- SNI. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- SNI. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- SNI. (2020). *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- Storn, R. & Price, K. (1997). "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces." *Journal of Global Optimization*. Vol. 11, No. 4, 341-359.