

OPTIMASI STRUKTUR BETON BERTULANG PADA PORTAL RUANG DENGAN ALGORITMA *SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH* (SOS)

Kevin Satiadarma¹, Doddy Prayogo², dan Jimmy Chandra³

¹ Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

² Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

³ Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

¹ b21240010@john.petra.ac.id, ² prayogo@petra.ac.id, ³ chandra.jimmy@petra.ac.id

ABSTRAK: Desain struktur beton bertulang yang tahan gempa sangat diperlukan di wilayah dengan aktivitas seismik tinggi. Beton bertulang sering digunakan sebagai material utama dalam desain struktur bangunan karena ketangguhannya. Namun, optimasi biaya struktur beton bertulang menghadapi tantangan besar akibat banyaknya variabel dan batasan dalam peraturan SNI. Penelitian ini menggunakan algoritma metaheuristik *sympiotic organisms search* (SOS) yang dikombinasikan dengan perangkat lunak analisis struktur ETABS untuk mengatasi masalah optimasi struktur beton. Studi kasus dilakukan pada struktur beton bertulang dengan portal ruang satu lantai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SOS dan ETABS dapat menghasilkan desain yang efisien dan ekonomis, memenuhi persyaratan desain seismik berdasarkan SNI 1726:2012 dan SNI 2847:2019. Metode ini memiliki potensi besar untuk diterapkan pada berbagai jenis bangunan guna mendukung desain struktur beton yang aman, ekonomis, dan tahan terhadap gaya seismik.

Kata kunci: struktur beton bertulang, portal ruang, optimasi, metaheuristik, *sympiotic organisms search*, desain seismik

ABSTRACT: Seismic-resistant reinforced concrete structures are essential in regions with high seismic activity. Reinforced concrete is commonly used as the primary material in structural design due to its durability and strength. However, optimizing the cost of reinforced concrete structures presents a significant challenge due to the numerous variables and limitations in the SNI regulations. This study uses the *sympiotic organisms search* (SOS) metaheuristic algorithm combined with ETABS structural analysis software to address the optimization of reinforced concrete structures. A case study is conducted on a single-story reinforced concrete spatial frame structure. The results show that the SOS method, combined with ETABS, can produce efficient and cost-effective designs that meet seismic design requirements based on SNI 1726:2012 and SNI 2847:2019. This method has significant potential for application across various types of buildings to support the design of safe, economical, and seismic-resistant concrete structures.

Keywords: reinforced concrete structures, space frame, optimization, metaheuristic, *sympiotic organisms search*, seismic design

1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material komposit yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur. Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2013), lebih dari 60% proyek konstruksi di Indonesia menggunakan beton, baik untuk skala kecil maupun besar. Struktur beton melibatkan komponen utama seperti beton dan tulangan baja, yang mempengaruhi berat dan biaya struktur. Biaya material beton lebih rendah dibandingkan baja, namun proses perancangannya kompleks dan dapat meningkatkan biaya akibat *trial and error* pada variabel penampang. Perancang struktur beton dituntut untuk merancang bangunan yang aman dan ekonomis, terutama di wilayah dengan risiko gempa tinggi seperti Indonesia.

Gempa bumi yang sering terjadi di Indonesia mengharuskan bangunan beton dirancang untuk menahan gaya seismik dominan, terutama pada bangunan bertingkat tinggi. Gaya lateral lebih berpengaruh dibandingkan gaya gravitasi, sehingga kegagalan akibat gempa harus dihindari. Oleh karena itu, perencana struktur beton perlu menerapkan prinsip desain tahan gempa sesuai dengan SNI 1726:2012 dan SNI 2847:2019. Proses perancangan struktur beton yang kompleks membutuhkan waktu dan biaya yang besar, karena melibatkan uji coba berulang pada berbagai variabel penampang untuk memenuhi *constraint* SNI.

Optimasi struktur beton merupakan tugas yang kompleks karena melibatkan ruang pencarian yang jauh lebih luas dibandingkan struktur baja (Gholizadeh & Aligholizadeh, 2013). Pada struktur baja, variabel optimasi terbatas pada dimensi profil dan mutu material, sedangkan struktur beton melibatkan variabel tambahan seperti dimensi penampang, mutu beton, dan tulangan baja. Oleh karena itu, pendekatan yang efisien seperti metode metaheuristik diperlukan untuk memperoleh solusi optimal. Metode ini menggunakan *randomization* dan *local search* untuk mencari solusi tanpa memerlukan parameter spesifik, seperti *sybiotic organisms search* (SOS) yang telah terbukti efektif dalam beberapa penelitian (Cheng & Prayogo, 2014).

Penelitian sebelumnya telah menggunakan metode metaheuristik seperti *simulated annealing* untuk mengurangi emisi CO_2 dalam produksi beton (Payá-Zaforteza et al., 2009) dan *genetic algorithm* untuk mengurangi biaya struktur dengan pendekatan *performance-based seismic design* (Mergos, 2018). Penelitian Mergos (2018) mengusulkan metode baru yang menggunakan *deformation-based procedure* untuk menentukan tulangan yang diperlukan pada setiap elemen beton, sehingga meminimalkan jumlah variabel dalam proses optimasi. Dengan pendekatan ini, penelitian hanya berfokus pada dimensi kolom dan balok untuk mendapatkan solusi optimal. Negrin et al. (2023) menggunakan *kriging-based metaheuristic* untuk mengoptimalkan desain portal beton 3D, mempertimbangkan aspek retak dan *soil-structure interaction*. Naftali (1999) mengusulkan metode optimasi *polyhedron* untuk struktur beton dengan jumlah variabel desain kecil.

Algoritma SOS telah dibandingkan dengan metode optimasi lainnya dalam penelitian yang dilakukan oleh Prayogo et al. (2017). Penelitian tersebut mengimplementasikan SOS pada berbagai permasalahan optimasi struktur, seperti optimasi balok dan rangka batang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SOS mampu memperoleh solusi minimum secara konsisten pada setiap run dengan jumlah *function evaluation* yang lebih sedikit dibandingkan algoritma lainnya, *differential evolution* (DE) dan *particle swarm optimization* (PSO).

Penelitian ini memanfaatkan perangkat lunak ETABS 21 dan MATLAB R2023a untuk menganalisis dan merancang struktur beton dengan memakai algoritma SOS. Manfaat dari penelitian ini adalah mengurangi berat struktur beton dan biaya. Selain itu, penelitian ini juga berkontribusi dalam mengoptimalkan dimensi balok induk serta kolom sesuai dengan SNI 1726:2012 dan SNI 2847:2019. Penelitian ini menggunakan studi kasus portal ruang

sederhana Naftali (1999) untuk membuktikan penerapan memakai algoritma SOS dalam permasalahan optimasi desain struktur beton bertulang tiga dimensi.

2. OPTIMASI STRUKTUR BETON BERTULANG

2.1 Variabel Desain

Variabel desain dalam penelitian ini meliputi elemen-elemen yang berubah selama proses optimasi. Variabel desain meliputi dimensi balok induk, kolom, ukuran tulangan longitudinal, dan ukuran tulangan transversal. Profil beton yang digunakan untuk balok induk dan kolom berupa penampang persegi panjang dengan bentuk yang seragam sepanjang bentang. Ukuran penampang beton memiliki rentang antara *upper bound* dan *lower bound* dengan kelipatan 50 mm untuk setiap elemen balok dan kolom. Ukuran tulangan longitudinal mengacu pada standar SNI 2052:2017 dengan menggunakan tulangan ulir. Setiap variabel desain yang digunakan adalah nilai diskrit, bukan nilai kontinu. Variabel-variabel ini dipilih untuk memastikan desain memenuhi kriteria kekuatan serta meminimalkan biaya total struktur beton.

2.2 Constraint

Dalam optimasi struktur beton bertulang, penerapan constraint sangat penting untuk memastikan proses optimasi tidak mengarah pada kegagalan struktur. *Constraint* yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ukuran penampang balok dan kolom, serta ukuran tulangan longitudinal dan transversal yang dirancang sesuai dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Joint gaya geser terfaktor (V_j) pada sambungan harus dapat dilawan oleh kekuatan nominal yang tersedia (V_n) sesuai dengan SNI 2847:2019. Selain itu, ketidakberaturan tipe 1a, 1b, 4, dan 5 harus dianalisis menggunakan model 3D. Struktur yang didesain juga harus memenuhi kriteria untuk kategori desain seismik C, D, E, atau F, dimana ketidakberaturan torsi tipe 1a atau 1b harus memeriksa pengecekan perpindahan akibat torsi.

2.3 Objective Function

Objective function adalah suatu fungsi yang menghasilkan nilai yang mencerminkan tujuan dari proses optimasi dalam penelitian. Dalam penelitian ini, tujuan utama yang ingin dicapai adalah meminimalkan biaya pembangunan struktur beton. Oleh karena itu, *objective function* yang digunakan dalam penelitian ini adalah biaya. Untuk menghitung biaya tersebut, volume beton dan massa tulangan yang terpasang pada struktur akan dihitung. *Objective function* yang digunakan untuk optimasi biaya struktur beton berdasarkan Esfandiari, et al. (2018) seperti pada Persamaan 1 dan 2:

$$Obj_c = C_c \left(\sum_{i=1}^{N_{col}} b_i \cdot d_i \cdot L_{n_{column,i}} + \sum_{j=1}^{N_{beam}} b_{wj} \cdot h_j \cdot L_{beam,j} \right) \quad (1)$$

$$Obj_s = C_s \cdot \gamma_s \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{col}} \sum_{j=1}^{N_{bar,i}} A_{Stj} \cdot L_{bar_j} + \sum_{i=1}^{N_{col}} \sum_{k=1}^{N_{tie,i}} A_{Shk} \cdot L_{tie_k} + \sum_{m=1}^{N_{beam}} \sum_{l=1}^{N_{bar,m}} A_{Stl} \cdot L_{bar_l} + \sum_{m=1}^{N_{col}} \sum_{n=1}^{N_{tie,m}} A_{Shn} \cdot L_{bar_n} \right) \quad (2)$$

dimana:

Obj_c = objective function beton (Rp)

Obj_s	= <i>objective function</i> baja (Rp)
N_{col}	= jumlah kolom (unit)
N_{beam}	= jumlah balok (unit)
b	= lebar kolom/balok (m)
h	= tinggi kolom/balok (m)
L	= jarak bentang kolom/balok (m)
L_n	= jarak bentang bersih kolom/balok (m)
C_c	= harga satuan beton (Rp/m ³)
C_s	= harga satuan baja (Rp/kg)
A_{st}	= luas tulangan utama (m ²)
L_{bar}	= panjang tulangan utama (m)
N_{bar}	= jumlah tulangan utama (unit)
A_{sh}	= luas tulangan transversal (m ²)
L_{tie}	= panjang tulangan transversal (m)
N_{tie}	= jumlah tulangan transversal (unit)
γ_s	= berat jenis baja (kg/m ³)

2.4 Symbiotic Organisms Search (SOS)

Metaheuristik merupakan algoritma yang dirancang untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan cara yang lebih kompleks dan efisien. Algoritma metaheuristik secara umum dapat menyelesaikan suatu permasalahan dengan lebih baik dibandingkan dengan algoritma tradisional (Yang, 2014). Dalam proses optimasi menggunakan metode metaheuristik, berbagai jenis algoritma diterapkan, masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan. Tujuan utama dari penggunaan metode metaheuristik adalah untuk menemukan solusi optimal dari sejumlah kemungkinan solusi yang ada untuk memecahkan masalah optimasi.

Algoritma *symbiotic organisms search* (SOS) merupakan salah satu metode metaheuristik yang diperkenalkan oleh Cheng & Prayogo (2014). SOS mensimulasikan interaksi simbiosis antara organisme dalam ekosistem. Simbiosis sendiri adalah interaksi biologis antara dua organisme yang berbeda dalam ekosistem. Dalam algoritma SOS, terdapat tiga fase yang merepresentasikan jenis-jenis interaksi antara dua organisme yang berbeda dalam ekosistem, yaitu fase mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Algoritma SOS bekerja secara iteratif dengan memanfaatkan populasi kandidat solusi untuk mengeksplorasi ruang pencarian guna menemukan solusi optimal (Cheng & Prayogo, 2014). Proses dimulai dengan pembentukan populasi awal yang disebut ekosistem, dimana sekelompok organisme

dihasilkan secara acak dalam ruang pencarian. Setiap organisme dalam ekosistem mewakili satu kandidat solusi untuk masalah yang sedang dihadapi. Setiap organisme juga memiliki nilai *fitness* yang mencerminkan tingkat adaptasinya terhadap tujuan yang diinginkan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

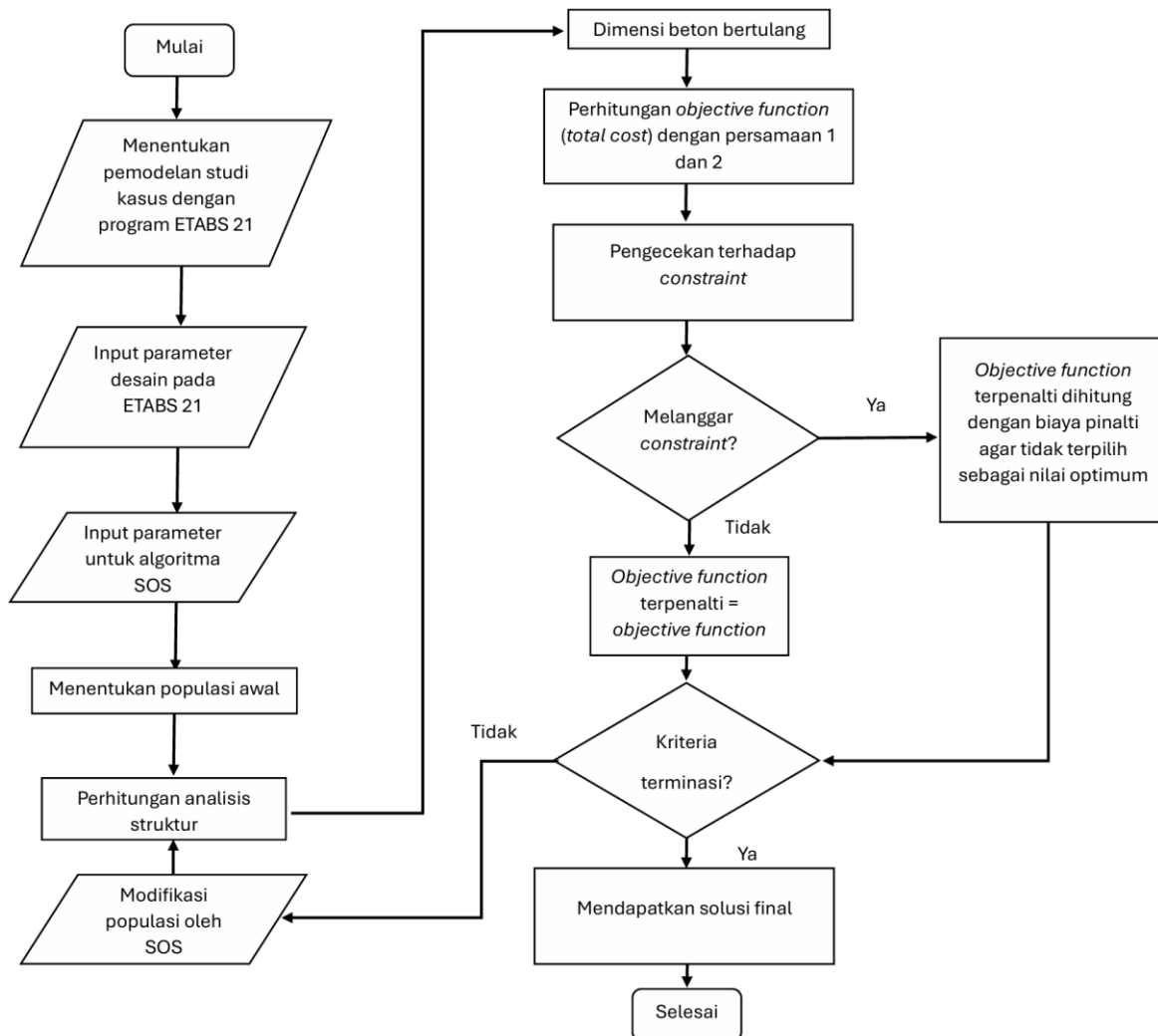
Proses pencarian solusi menghasilkan *fitness* minimum dilakukan dengan algoritma metaheuristik, yaitu *symbiotic organisms search* (SOS). Dalam penelitian ini, data yang dihasilkan berupa biaya optimal dari struktur rangka beton yang digunakan sebagai studi kasus. Proses optimasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2023a yang menjalankan algoritma metaheuristik SOS. Program MATLAB terintegrasi dengan perangkat lunak ETABS 2000 v21 untuk analisis dan desain struktur beton bertulang. Hasil dari algoritma SOS menghasilkan *output* berupa total biaya material yang paling ekonomis, yaitu akumulasi biaya dari penampang dan tulangan beton yang dipilih. Studi kasus ini diterapkan dengan 50 iterasi dan populasi sebanyak 20. Pemilihan jumlah populasi ini didasarkan pada jumlah variabel penelitian yang relatif sedikit, yaitu 16 variabel, serta karakteristik struktur yang dianalisis berupa portal ruang 1 lantai, yang relatif sederhana sehingga tidak memerlukan populasi besar. Selain itu, jumlah iterasi 50 dipilih dengan *trial & error*, yang menunjukkan bahwa nilai tersebut sudah cukup untuk mencapai konvergensi solusi dalam optimasi biaya struktur beton bertulang.

Proses optimasi dilakukan dengan langkah-langkah teknis yang terstruktur. Tahap pertama melibatkan penentuan kasus yang akan dioptimasi, yaitu struktur bangunan beton satu lantai yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETABS 21. Selanjutnya, parameter desain dimasukkan ke dalam ETABS 21 sesuai dengan data yang tercantum. Metode metaheuristik *symbiotic organisms search* (SOS) diatur dengan menetapkan jumlah populasi, jumlah iterasi, serta batasan area pencarian (*upper bound* dan *lower bound*) untuk setiap variabel, yang berfungsi membatasi pencarian dan mencegah pelanggaran *constraint* dimensi.

Tahap inisialisasi populasi dilakukan oleh algoritma dengan memilih angka secara acak untuk lebar dan tinggi elemen beton dalam jangkauan *upper bound* dan *lower bound* untuk setiap variabel. Selanjutnya, analisis struktur dilakukan menggunakan ETABS dengan beban yang diaplikasikan berdasarkan ketentuan SNI 1727:2013. Proses desain dilakukan dengan fitur *concrete design* ETABS sesuai dengan SNI 2847:2019 yang mengatur spesifikasi perencanaan tulangan dan komponen struktur beton bertulang. Penelitian ini menggunakan SNI 1726:2012 sebagai acuan desain ketahanan gempa agar hasil analisis tetap sebanding dengan studi terdahulu oleh Naftali (1999). Setelah itu, *objective function* dihitung, dengan penambahan penalti jika terdapat *constraint* yang dilanggar. Organisme yang melanggar *constraint* tetap termasuk dalam populasi, namun penalti diberikan untuk mencegah solusi yang melanggar batasan tersebut menjadi *fitness* terbaik. Tujuannya adalah untuk mendorong algoritma menemukan solusi yang optimal dan mematuhi seluruh persyaratan desain.

Penalty handling pada fungsi objektif diterapkan menggunakan pendekatan yang diusulkan oleh Deb (2000), dimana biaya penalti dihitung sebagai jumlah total pelanggaran *constraint* ditambah nilai maksimum dari solusi yang memenuhi *constraint*. Pendekatan ini memastikan bahwa solusi yang melanggar *constraint* tidak dianggap sebagai solusi terbaik (*fitness* terbaik) dalam proses optimasi. Penalti diberikan sebelum perhitungan *objective function* untuk memastikan bahwa solusi yang melanggar batasan tidak menjadi *fitness* terbaik, sehingga

membantu algoritma mencapai solusi yang lebih optimal dan sesuai dengan persyaratan desain. Setelah perhitungan *objective function*, algoritma SOS memeriksa kriteria terminasi. Jika kriteria terminasi belum terpenuhi, populasi dan iterasi akan dimodifikasi kembali. Sebaliknya, jika kriteria terminasi tercapai, solusi optimal akan diperoleh. Diagram alir proses penelitian disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses optimasi menggunakan algoritma *symbiotic organisms search* (SOS)

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1 Studi Kasus Penelitian

Studi kasus diambil berdasarkan penelitian Naftali (1999). Studi kasus dalam penelitian ini mengacu pada struktur rangka beton bertulang sederhana. Gambar 2 menunjukkan model 3D dari struktur bangunan yang dioptimasi. Mutu beton yang digunakan adalah 30 MPa. Beban merata yang diterapkan pada *frame* gedung beton sederhana satu lantai adalah sebesar 35 kN/m. Klasifikasi tanah yang digunakan mengikuti pedoman SNI 1726:2012, dengan kelas situs SE yang menunjukkan jenis tanah lunak. Beton didesain dengan sistem rangka pemikul momen khusus, dimana koefisien modifikasi respons R (8), faktor kuat lebih sistem Ω_0 (3), dan faktor pembesaran defleksi C_d (5,5). Analisis respon spektrum dilakukan dengan periode

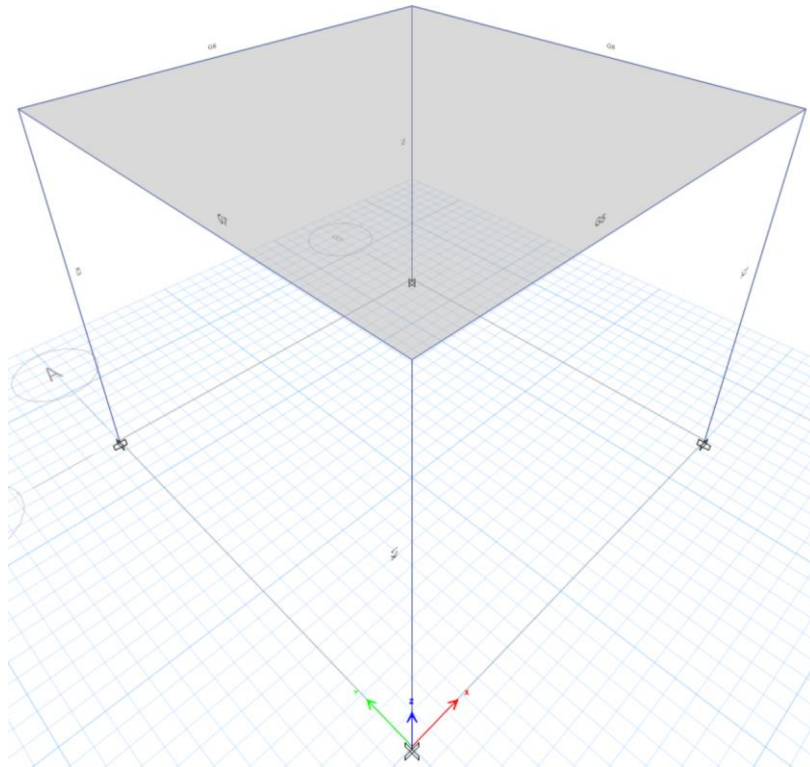
struktur TL (20) detik, dimana parameter S_1 (0.5) dan S_s (1.1) digunakan untuk menghasilkan respon spektrum sesuai dengan kriteria desain struktural.

Penelitian Naftali (1999) menggunakan optimasi *polyhedron* untuk menyelesaikan studi kasus ini. Pada desain awal berdasarkan penelitian Naftali, didapatkan biaya struktur sebesar Rp 24.663.037 dengan rincian yang dapat dilihat pada Tabel 1. Metode *polyhedron* yang digunakan oleh Naftali fokus pada pencarian optimal berdasarkan volume tulangan dan dimensi struktur. Hasil desain awal menunjukkan penggunaan volume beton lebih besar, yang berdampak pada biaya yang lebih mahal.

Tabel 1. Perbandingan volume tulangan dan beton terhadap elemen kolom & balok pada desain awal.

Jenis Elemen	Volume	Harga Satuan (Rp)	Subtotal (Rp)
Elemen Kolom			
Tulangan Transversal & Longitudinal Kolom (kg)	701,422	12.500	8.768.032
Volume Beton Kolom ($f'c' = 30 \text{ MPa}$) (m^3)	4,11	1.010.000	4.151.100
Elemen Balok			
Tulangan Transversal & Longitudinal Balok (kg)	573,892	12.500	7.173.655
Volume Beton Balok ($f'c' = 30 \text{ MPa}$) (m^3)	4,525	1.010.000	4.570.250
Total Biaya (Rp)			24.663.037

Pada studi kasus 1, terdapat 16 variabel yang meliputi 4 elemen balok dan 4 elemen kolom, dengan setiap variabel berupa tinggi dan lebar penampang dari elemen balok dan kolom. Dalam proses optimasi, *constraint* dimensi ditetapkan untuk menghindari hasil yang terlalu bervariasi dan tidak optimal. Penerapan *engineering judgment* dilakukan melalui pengambilan angka secara acak oleh algoritma dalam batas *lower bound* dan *upper bound*. Proses pencarian populasi menggunakan *lower bound* dimensi awal -0,2 m dan *upper bound* dimensi awal +0,2 m untuk memastikan model bangunan tidak melanggar *constraint* dimensi. Algoritma SOS dijalankan dengan batas bawah pada *lower bound* dan batas atas pada *upper bound* ditambah 0,3 m untuk dimensi yang dioptimasi. Proses optimasi dilakukan pada komputer dengan spesifikasi CPU komputer Ryzen 5 5600G dengan *base clock speed* 3.9 GHz dan RAM 16 GB.



Gambar 2. Pemodelan struktur beton 3D pada ETABS

4.2 Hasil Optimasi SOS

Berdasarkan Tabel 2, algoritma *symbiotic organisms search* (SOS) menunjukkan kemampuan menghasilkan desain struktur yang memenuhi semua constraint dengan penurunan biaya sebesar 11,62% dibandingkan populasi awal. Setelah 50 iterasi, algoritma SOS berhasil mengurangi biaya struktur sebesar 9,5% dibandingkan desain awal, menunjukkan efisiensi dan efektivitasnya dalam mengoptimasi desain struktur beton bertulang. Detail penulangan hasil optimasi menggunakan algoritma SOS dapat dilihat pada Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Perbandingan volume tulangan dan beton terhadap elemen kolom & balok menggunakan optimasi SOS.

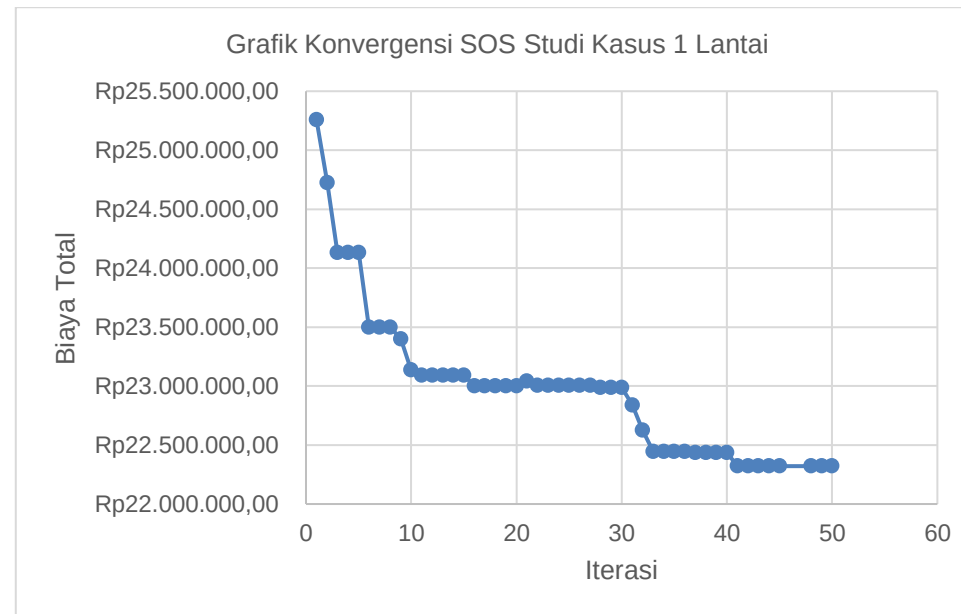
Jenis Elemen	Volume	Harga Satuan (Rp)	Subtotal (Rp)
Elemen Kolom			
Tulangan Transversal & Longitudinal Kolom (kg)	915,552	12.500	11.444.398
Volume Beton Kolom ($f'c' = 30 \text{ MPa}$) (m^3)	2,925	1.010.000	2.954.250
Elemen Balok			
Tulangan Transversal & Longitudinal Balok (kg)	355,732	12.500	4.446.648
Volume Beton Balok ($f'c' = 30 \text{ MPa}$) (m^3)	3,44	1.010.000	3.475.981
Total Biaya			22.321.279

Tabel 3. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus

Lantai	Nama ID Elemen	Panjang Kolom (m)	Lebar Kolom (m)	Tinggi Kolom (m)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Senggang arah y	Tulangan Senggang arah x
LT.1	K1	0.35	0.35	5	8D19	3D10-50	3D10-50
LT.1	K2	0.4	0.4	5	8D22	3D10-50	3D10-50
LT.1	K3	0.4	0.45	5	8D22	3D10-50	3D10-50
LT.1	K4	0.35	0.35	5	8D19	3D10-50	3D10-50

Tabel 4. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus

Lantai	ID Elemen	Lebar Balok (m)	Tinggi Balok (m)	Bentang Balok (m)	Tulangan Tumpuan-I Atas	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Tumpuan-J Atas	Tulangan Tumpuan-I Bawah	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan-J Bawah	Sengkang Tumpuan-I	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan-J
LT.1	G5	0.25	0.6	6	2D19	2D19	3D19	2D19	4D19	2D19	2D8-100	2D8-250	2D8-100
LT.1	G6	0.25	0.55	6	3D19	2D19	2D19	2D19	4D19	2D19	2D8-100	2D8-225	2D8-100
LT.1	G7	0.3	0.5	6	3D19	2D19	4D19	3D19	4D19	2D19	2D8-100	2D8-200	2D8-100
LT.1	G8	0.25	0.7	6	2D19	2D19	2D19	2D19	4D19	2D19	2D8-100	2D8-300	2D8-100



Gambar 3. Grafik konvergensi algoritma SOS

1.

Waktu rata-rata yang diperlukan untuk menjalankan algoritma pada setiap iterasi adalah 4 jam, sehingga total waktu pemrosesan untuk 50 iterasi pada studi kasus mencapai 200 jam. Berdasarkan Gambar 3, studi kasus portal ruang satu lantai menunjukkan bahwa grafik *fitness* telah mencapai konvergensi. Hal ini terlihat dari iterasi ke-41 hingga ke-50, dimana algoritma SOS tidak lagi menunjukkan penurunan nilai *fitness*. Nilai *fitness* terkecil atau *best organism* yang diperoleh selama 50 iterasi SOS adalah sebesar Rp 22.321.279.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan diskusi pada studi kasus, dapat disimpulkan bahwa peneliti berhasil menemukan dimensi dan tulangan yang optimal untuk elemen balok dan kolom pada struktur beton satu lantai. Biaya total struktur yang diperoleh menunjukkan tingkat ekonomis yang baik dan memenuhi kriteria keamanan. Pada studi kasus ini, penggunaan algoritma *symbiotic organisms search* (SOS) berhasil menghasilkan biaya total struktur sebesar Rp 22.321.279 yang lebih rendah sebesar 9,5% dibandingkan dengan desain awal. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma SOS mampu mengoptimalkan desain struktur sehingga menghasilkan biaya yang lebih ekonomis dan efisien. Penerapan algoritma SOS terbukti efektif dalam menyelesaikan masalah desain struktur beton satu lantai, menghasilkan solusi yang lebih optimal dan memenuhi syarat aman.

6. DAFTAR REFERENSI

- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa, SNI 1726:2012*. Author.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *Beban Desain Minimum dan Kriteria terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur lain, SNI 1727:2013*. Author.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *Baja Tulangan Beton, SNI 2052:2017*. Author.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, SNI 2847:2019*. Author.
- Bergan, G. P., & Holland, I. (1979). Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures. *Advances in Engineering Software*, 115, 149–160. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90027-6)
- Cardoso, E. U., Rodríguez, R. Q., Machado, L. Q., Kunz, F. F., Santos, P. D. S. E., & Da Costa Quispe, A. P. (2022). Structural Optimization of Concrete Plane Frames considering the Static and Dynamic Wind Effect. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 15(1). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952022000100009>
- Cheng, M.Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm. *Computers & Structures*, 139, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>.
- Deb, K. (2000). An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2-4), 311–338. [https://doi.org/10.1016/s0045-7825\(99\)00389-8](https://doi.org/10.1016/s0045-7825(99)00389-8).
- Esfandiari, M. J., Urgessa, G. S., Sheikholarefin, S., & Manshadi, S. H. D. (2018). Optimum Design of 3D Reinforced Concrete Frames using DMPSO Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 115, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.09.007>

- Gholizadeh, S., & Aligholizadeh, V. (2013). Optimum Design of Reinforced Concrete Frames using Bat Metaheuristic Algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 3(3), 483-497. <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-145-en.html>
- Mergos, P. E. (2018). Efficient Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Frames with Nonlinear Structural Analysis Procedures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(6), 2565–2581. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2036-x>
- Naftali, Y. (1999). *Reinforced Concrete Optimization on Space Frame*. [Thesis]. Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Negrin, I., Kripka, M., & Piqueras, V. Y. (2023). Metamodel-assisted Meta-heuristic Design Optimization of Reinforced Concrete Frame Structures considering Soil-structure Interaction. *Engineering Structures*, 293, 116657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116657>
- Nugroho, D., Saputra, A.A., & Cahyono, D.A. (2020). Analisis Balok dan Kolom Struktur Beton (Studi Kasus Café di Jl. Manunggal, Desa Gedongombo, Kecamatan Semanding, Kabupaten Tuban). *Wahana Teknik*, 9(2), 1-15.
- Payá-Zaforteza, I., Piqueras, V. Y., Hospitaler, A., & González-Vidosa, F. (2009). CO2-Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501–1508. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>
- Peranan Beton dalam Pembangunan Infrastruktur Indonesia*. (2013, October 24). Kementerian PUPR. <https://pu.go.id/berita/peranan-beton-dalam-pembangunan-infrastruktur-indonesia>
- Prayogo, D., Cheng, M., & 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). <https://doi.org/10.9744/ced.19.1.36-43>
- Salimi, P., Boderabady, H. R., & Kaveh, A. (2022). Optimal Design of Reinforced Concrete Frame Structures using Cascade Optimization Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(4), 1220-1233. <https://doi.org/10.3311/ppci.20868>
- Yang, X. (2014). *Nature-inspired Optimization Algorithms*. Elsevier Science Limited.