



PENGEMBANGAN METODE DAN ALGORITMA METAHEURISTIK  
UNTUK OPTIMASI DESAIN STRUKTUR BANGUNAN

SEMINAR BIDANG KAJIAN

Aep Saepuloh  
99222001

PROGRAM DOKTOR TEKNOLOGI INFORMASI  
UNIVERSITAS GUNADARMA  
Juni 2024

## Daftar Isi

<b>Daftar Isi .....</b>	<b>2</b>
<b>Daftar Gambar .....</b>	<b>3</b>
<b>Daftar Tabel.....</b>	<b>4</b>
<b>1   Pendahuluan.....</b>	<b>5</b>
1.1   Latar Belakang .....	5
1.2   Batasan dan Tujuan .....	7
1.3   Kontribusi .....	7
<b>2   Tinjauan Pustaka.....</b>	<b>7</b>
2.1   Tinjauan 1 .....	8
2.2   Tinjauan 2 .....	9
2.3   Tinjauan 3 .....	14
2.4   Perbandingan Tinjauan .....	22
<b>3   Metodologi .....</b>	<b>34</b>
3.1   Motivasi .....	35
3.2   Framework Riset .....	35
3.3   Pendekatan.....	37
<b>4   Daftar Pustaka .....</b>	<b>38</b>

## Daftar Gambar

Gambar 1 Klasifikasi MAs Berdasarkan Sumber Inspirasi .....	11
Gambar 2 Klasifikasi MAs Berdasarkan Ukuran Populasi.....	11
Gambar 3 Klasifikasi MAs Berdasarkan Jumlah Parameter Utama .....	13
Gambar 4 Macam-macam Penampang Balok Kantilever .....	16
Gambar 5 Balok Kantilever dengan Sambungan Las .....	16
Gambar 6 Pegas.....	17
Gambar 7 Struktur Rangka 3 Batang .....	18

## Daftar Tabel

Tabel 1 Perbandingan berbagai kategori algoritma metaheuristik.....	8
Tabel 3 Perbandingan tinjauan.....	22

# 1 Pendahuluan

## 1.1 Latar Belakang

Analisis struktur yang merupakan bagian integral dari setiap proyek infrastruktur. Rekayasa struktur adalah proses memprediksi kinerja struktur tertentu di bawah kondisi pembebanan yang ditentukan. Karakteristik kinerja yang biasanya menjadi perhatian dalam desain struktur adalah: (a) tegangan atau resultan tegangan (yaitu gaya aksial, geser, dan momen lentur); (b) lendutan; dan (c) reaksi tumpuan (Aslam Kassimali, 2010). Gere, (2004) mendefinisikan analisis struktur sebagai ilmu untuk menentukan efek dari beban pada struktur fisik dan komponennya. Analisis struktur untuk struktur sederhana dapat menggunakan beberapa metode klasik, dengan tujuan memberikan pemahaman tentang bagaimana beban disalurkan melalui struktur dan bagaimana struktur akan mengalami deformasi dibawah beban. Kekurangan dari metode klasik yaitu menghabiskan waktu yang lama, rumit dan rentan terjadi kesalahan karena dihitung secara manual (Oktaviani *et al.*, 2023). Analisis struktur untuk stuktur tidak sederhana atau kompleks dapat menggunakan metode matriks. Menurut Hibbeler (2020) metode matriks dalam program komputer paling efisien untuk menganalisis struktur.

Metode matriks berkembang sejalan dengan penggunaan komputer untuk perhitungan aritmatika yang sistematis dan sederhana sehingga mengurangi waktu analisis dan meningkatkan keakuratan perhitungan. Prayogo et al., (2018) berpendapat metode *trial-and-error* digunakan untuk menentukan pemilihan profil yang didasarkan intuisi dan pengalaman pribadi, sehingga metode tersebut tidak menjamin terwujudnya suatu desain yang optimal. Itulah sebabnya para peneliti berinisiatif untuk mengembangkan berbagai macam metode optimasi. Penerapan optimasi pada struktur rangka batang diharapkan mampu menghasilkan efisiensi penggunaan bahan namun masih tetap memenuhi persyaratan desain yang mencakup *safety* dan *serviceability*. Widjajanto, Giantara and Prayogo, (2015) mengartikan optimal sebagai solusi yang lebih baik dibandingkan Solusi yang sudah ada. Lagaros *et al.*, dalam (Widjajanto, Giantara and Prayogo, 2020) berpendapat solusi optimal yang diperoleh dari perhitungan tidak pernah tercapai

secara absolut dan terdapat ketidakpastian dan keacakan yang terjadi di lapangan, serta kemampuan optimalnya mungkin berkurang karena terdapat ketidakpastian yang dihindari. Untuk menjelaskan ketidakpastian dan keacakan beberapa parameter yang mempengaruhi kekuatan struktur, beberapa formulasi untuk optimasi dikembangkan dengan analisis stokastik.

Perkembangan teknologi komputer memungkinkan melakukan optimasi dalam proses desain struktur. Pengembangan algoritma dalam teknik optimasi suatu struktur agar menjadi lebih efisien. Menurut Khodadadi et al., (2023) optimasi dapat didefinisikan secara matematis sebagai meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif yang spesifik pada suatu masalah dengan memenuhi batasan tertentu. Algoritma optimasi dipisahkan menjadi dua kelas, yaitu deterministik dan stokastik. Metode deterministik juga diklasifikasikan sebagai metode komputasi dan metode berbasis gradien. Dalam masalah optimasi struktur, Talatahari et al., (2012) dan Mortazavi, (2020) menulis tujuan utama optimasi adalah meminimalkan berat atau biaya struktur dengan tetap memenuhi persyaratan dari bangunan tersebut.

Penentuan solusi yang paling optimal dalam dalam praktik keinsinyuran dengan kompleksitas tinggi, saling ketergantungan, dan nonlinier dapat menjadi rumit dan memakan waktu. Untuk memudahkan proses tersebut, berbagai jenis metode optimasi metaheuristik yang dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir menjadi alternatif yang prospektif. Metode-metode ini dapat mengurangi waktu dalam menentukan solusi mendekati optimal yang dapat diterima (Pan and Zhang, 2021). Menurut Tomar, Bansal and Singh (2023) Algoritma metaheuristik adalah teknik optimasi yang dirancang untuk menemukan solusi yang memadai untuk berbagai masalah optimasi. Abualigah et al., (2021) menjelaskan algoritma optimasi metaheuristik memiliki dua strategi pencarian yang penting: (1) eksplorasi/diversifikasi dan (2) eksploitasi/intensifikasi. Dimana eksplorasi adalah kemampuan untuk menjelajahi ruang pencarian secara global. Kemampuan ini terkait dengan penghindaran optima lokal dan menyelesaikan jebakan optima lokal. Sebaliknya, eksploitasi adalah kemampuan untuk mengeksplorasi solusi-solusi yang memungkinkan untuk meningkatkan kualitasnya secara lokal. Performa yang

sangat baik dari sebuah algoritma membutuhkan keseimbangan yang tepat antara kedua strategi ini.

Dari uraian paragraf tersebut penulis melakukan studi literatur atau studi kepustakaan terkait peluang pengembangan algoritma metaheuristik sebagai alternatif dari proses optimasi desain struktur dalam bidang Teknik Sipil.

## **1.2 Batasan dan Tujuan**

Batasan masalah pada penulisan ini difokuskan untuk stuktur bangunan Teknik Sipil sebagai objek penelitian. Tujuan dari penelitian diuraikan sebagai berikut:

- a. Mengembangkan metode analisa struktur dan algoritma metaheuristik untuk optimasi desain struktur
- b. Mengevaluasi efektifitas metode dan algoritma tersebut dalam memperoleh nilai optimasi desain struktur
- c. Menganalisis peluang dan tantangan mengembangkan metode tersebut dengan teknologi AI dan mengimplementasikan metode dan algoritma tersebut dalam desain bangunan Teknik Sipil

## **1.3 Kontribusi**

Secara umum, usulan penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi keilmuan untuk bidang Teknologi Informasi dan bidang Teknik Sipil dan secara khusus kontribusi kepada para pihak yang terkait proyek konstruksi seperti para perencana struktur dan pemilik proyek.

## **2 Tinjauan Pustaka**

Metode yang digunakan pada dalam makalah ini adalah studi kepustakaan. Studi kepustakaan merupakan ikhtisar komprehensif tentang penelitian yang sudah dilakukan mengenai topik yang spesifik untuk menunjukkan kepada pembaca apa yang sudah diketahui tentang topik tersebut dan apa yang belum diketahui, untuk mencari topik rasional dari penelitian yang sudah dilakukan atau untuk ide penelitian selanjutnya (Denney and Tewksbury, 2013). Penelitian dimulai dengan

mencari artikel, paper, dan tulisan ilmiah terkait pengembangan algoritma optimasi dalam bidang Teknik Sipil. Perangkat lunak *publish or perish* digunakan untuk mengambil dan menganalisis kutipan akademik. Ini menggunakan berbagai sumber data untuk mendapatkan kutipan mentah, kemudian menganalisisnya dan menyajikan berbagai metrik kutipan, termasuk jumlah makalah, total kutipan, dan indeks-h. *Publish or perish* menyertakan file bantuan mendetail dengan kiat pencarian dan informasi tambahan tentang sitasi metrik (Anne-Wil Harzing, 2017).

## 2.1 Tinjauan 1

**Judul** : *Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review*

**Penulis** : Tomar, Bansal and Singh

**Tahun** : 2024

**Jurnal** : MDPI

**Tujuan** : Menyajikan gambaran umum singkat tentang algoritma-algoritma sehingga para peneliti dapat memilih dan menggunakan metode metaheuristik terbaik untuk masalah optimasi dan memberikan tinjauan komprehensif persamaan dan perbedaan terhadap lima basis algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari alam diantaranya metode *evolution-based methods*, *swarm intelligence-based*, *physics-based*, *human-related*, dan *hybrid metaheuristics*.

**Metode** : Studi kepustakaan

**Pembahasan** : Tomar, Bansal and Singh (2024) membandingkan lima basis algoritma metaheuristik seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan berbagai kategori algoritma metaheuristik

No.	Jenis Algoritma	Klasifikasi	Gagasan Fundamental	Penerapan
1	<i>Evolution-based</i>	<i>Genetic Algorithm (GA)</i>	<i>Operator genetik, evolusi populasi</i>	<i>Berbagai macam</i>
2	<i>Swarm intelligence-based Physics-based Human-related Hybrid</i>	<i>Firefly Algorithm (FA)</i>	<i>Daya tarik dan pergerakan berdasarkan kecerahan</i>	<i>tantangan pengoptimalan</i>
3	<i>Evolution-based</i>	<i>Gravitational Search Algorithm (GSA)</i>	<i>Gravitasi, massa, akselerasi, daya tarik</i>	<i>Masalah dalam lingkungan yang dinamis atau berkembang</i>



4	<i>Swarm intelligence-based Physics-based Human-related Hybrid</i>	<i>Teaching-based Learning Optimization (TBLO)</i>	<i>Strategi pengajaran, kolaborasi, berbagi pengetahuan</i>	<i>Masalah di mana analogi fisik dapat digunakan</i>
5	<i>Evolution-based</i>	<i>Hybrid Metaheuristic Algorithms Fundamental</i>	<i>Kombinasi beberapa algoritma atau teknik</i>	<i>Pengetahuan khusus domain atau masalah kendala</i>

Tomar, Bansal and Singh (2024) menuliskan kemungkinan penelitian untuk mengeksplorasi pengembangan varian biner dari algoritma metaheuristik, para peneliti juga dapat memeriksa potensi penggunaan fungsi transfer berbentuk S dan V yang baru dan inovatif. Selain itu, literatur yang ada terutama berfokus pada dua tujuan dalam pemilihan fitur, yaitu memaksimalkan akurasi dan meminimalkan jumlah fitur yang dipilih. Namun, mungkin ada baiknya bagi para peneliti untuk mempertimbangkan tujuan lain, seperti waktu komputasi, kompleksitas (*complexity*), stabilitas, dan skalabilitas, dalam pemilihan fitur multi-objektif (*multi-objective feature selection*). Penting untuk dicatat bahwa meskipun para peneliti telah mengembangkan banyak intuisi di balik algoritma ini, algoritma ini sebagian besar bekerja seperti “kotak hitam”. Jadi, sulit untuk memprediksi algoritma mana dalam bentuk tertentu yang dapat bekerja lebih baik untuk masalah optimasi. Karena terus menemukan masalah baru dan menuntut kinerja yang lebih baik untuk masalah yang sudah ada, peneliti harus terus berupaya melakukan penelitian. Tomar *et al.*, juga memberikan rumusan masalah seperti: “*bagaimana parameter yang bergantung pada algoritma mempengaruhi kinerja algoritma? bagaimana algoritma metaheuristik dapat beroperasi seefektif mungkin, berapa rasio ideal antara eksplorasi dan eksploitasi? Manfaat apa yang dapat diperoleh algoritma dari penggunaan memori algoritmik?*”. Makalah ini juga membahas beberapa tantangan dari algoritma metaheuristik.

## 2.2 Tinjauan 2

**Judul** : *An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges*

**Penulis** : Kanchan Rajwar, Kusum Deep, dan Swagatam Das.

**Tahun** : 2023

**Jurnal** : Artificial Intelligence Review

**Tujuan** : Artikel ini menyajikan sebuah survei metaheuristik baru-baru ini. Kumpulan data untuk penelitian ini berisi sekitar 540 MA (*Metaheuristic Algorithms*). Studi ini memberikan analisis yang kritis namun konstruktif, membahas praktik-praktik metodologis yang tidak tepat untuk mencapai penelitian yang bermanfaat. Klasifikasi baru MA diusulkan berdasarkan jumlah parameter. Keterbatasan metaheuristik, serta tantangan terbuka, disoroti. Beberapa arah penelitian potensial di masa depan untuk metaheuristik telah diidentifikasi.

**Metode** : Studi kepustakaan

**Pembahasan** : Dalam penelitiannya Rajwar, Deep and Das (2023) mereviu hasil temuan dari 540 MAs (*metaheuristic algorithms*) dan menguraikan dalam beberapa subbab sebagai berikut:

1. Pendahuluan
2. *Brief history* (Sejarah singkat)
3. Metaheuristik
  - a. *Enhanced of algorithms* (Peningkatan algoritma)
  - b. *Hybridization of algorithms* (perpaduan algoritma)
    - i. *Level of hybridization* (Tingkat perpaduan)
    - ii. *Order of execution* (Urutan eksekusi)
  - c. *Control strategy* (Strategi kontrol)
  - d. *Comparison of MAs* (Perbandingan tiap MA)
  - e. *Multi/many objective optimization* (Banyaknya optimasi objektif)
  - f. *Review articles* (Reviu Artikel)
  - g. *Benchmark test functions* (fungsi tolok ukur)
4. *Statistical analysis* (Analisis statistik)
5. *Constructive criticism* (kritik yang konstruktif)
6. *Taxonomy* (Taksonomi)
  - a. *Taxonomy by source of inspiration*

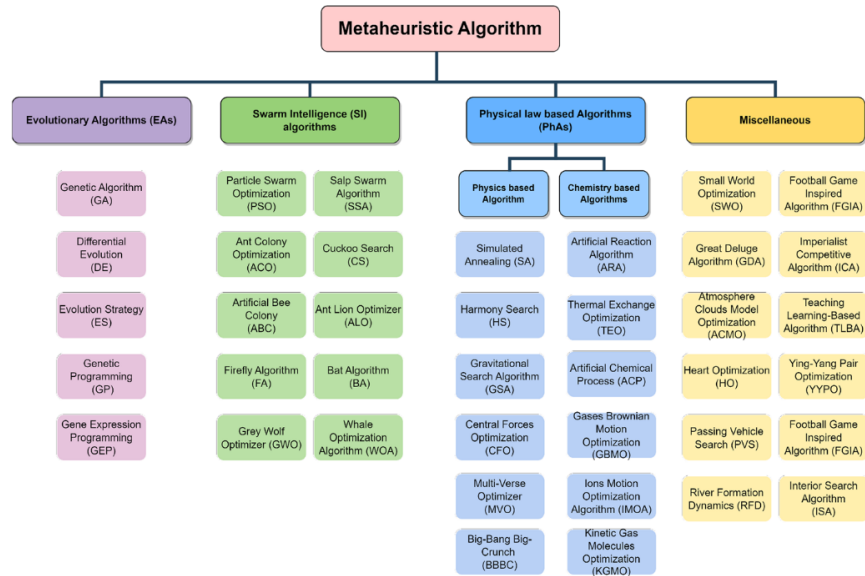


Fig. 5 Classification of MAs based on the source of inspiration

Gambar 1 Klasifikasi MAs Berdasarkan Sumber Inspirasi

- i. *Evolutionary algorithms (EAs)*
- ii. *Swarm intelligence (SI) algorithms*
- iii. *Physical law-based algorithms (PhAs)*
  1. *Physics based algorithms*
  2. *Chemistry based algorithms*
- iv. *Miscellaneous (Lain-lain)*
- b. *Taxonomy by population size*
  - i. *Trajectory-based algorithms (TAs)*

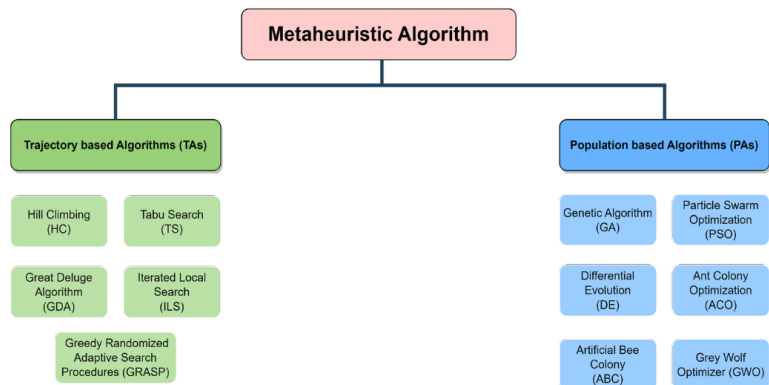


Fig. 6 Classification of MAs based on the size of the population

Gambar 2 Klasifikasi MAs Berdasarkan Ukuran Populasi

- ii. *Population-based algorithms (PAs)*
- c. *Taxonomy by movement of population*

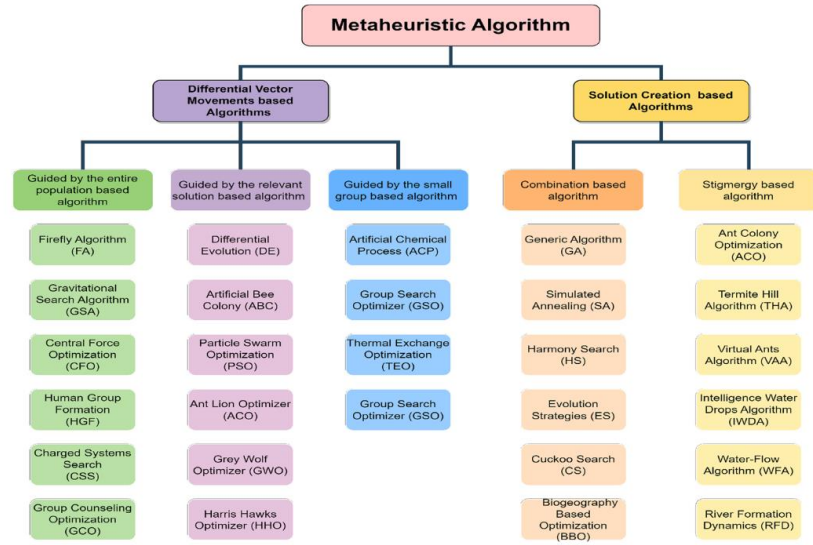


Fig. 7 Classification of MAs based on the movement of the population

Gambar 3 Klasifikasi MAs Berdasarkan Perpindahan Populasi

- i. *Differential vector movement (DVM)*
- ii. *Solution creation (SC)*
- d. *Taxonomy by number of parameters*
  - i. *Free-parameter based algorithms (FPAs)*
  - ii. *Mono-parameter based algorithms (MPAs)*
  - iii. *Bi-parameter based algorithms (BPAs)*
  - iv. *Tri-parameter based algorithms (TrPAs)*
  - v. *Tetra-parameter based algorithms (TePAs)*
  - vi. *Penta-parameter based algorithms (PPAs)*
  - vii. *Miscellaneous*

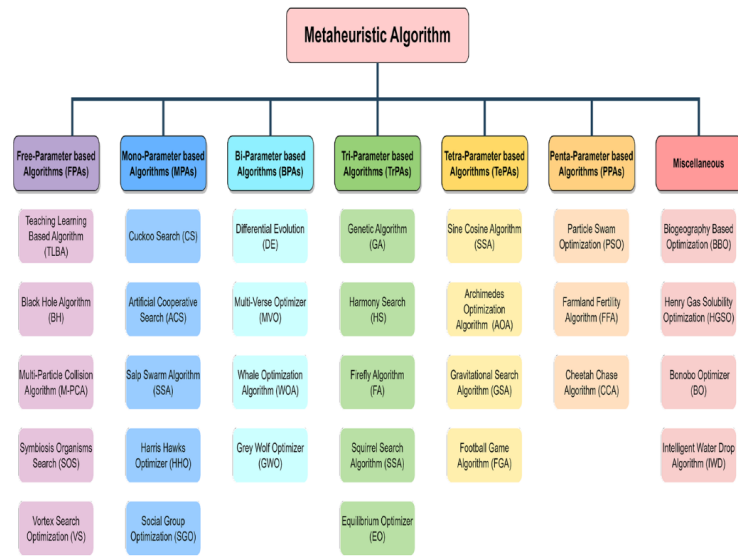


Fig. 8 Classification of MAs based on the number of primary parameters

Gambar 3 Klasifikasi MAs Berdasarkan Jumlah Parameter Utama

7. *Applications* (penggunaan)
  - a. *NP-hard problems*
  - b. *Medical science*
  - c. *Semantic web*
  - d. *Industry*
  - e. *Swarm drones and robotics*
  - f. *Differential equation*
  - g. *Image processing*

8. *Limitation and open problem*

Dalam artikel ini, beberapa tantangan terkait dengan pengembangan algoritma optimasi multiagent (MA) dibahas. Tantangan pertama adalah menciptakan kerangka kerja yang terpadu untuk menganalisis semua MA secara matematis sehingga dapat menentukan konvergensi, laju konvergensi, stabilitas, dan ketahanan algoritma. Selanjutnya, tantangan kedua adalah mengoptimalkan parameter algoritma untuk masalah tertentu dan memodifikasi atau menyesuaikan parameter tersebut agar algoritma dapat berkinerja lebih baik. Tantangan ketiga adalah menentukan metrik yang bermanfaat untuk mengukur kinerja algoritma dan menyediakan set fungsi tolok ukur yang dapat diandalkan. Selain itu, penting untuk menentukan pengukuran kinerja yang proporsional agar dapat membandingkan semua algoritma dengan objektif yang sama. Tantangan berikutnya adalah meningkatkan efisiensi algoritma yang telah terbukti sukses dalam lingkungan optimisasi multiagent untuk masalah dunia nyata. Terakhir, dalam membangun algoritma MA, penting untuk mencari keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi untuk mencapai kinerja terbaik.

9. *Future scope*

## 10. Conclusion (Kesimpulan)

Dapat disimpulkan dari data statistik bahwa selama dekade terakhir, sekitar 38 MA muncul rata-rata setiap tahunnya. Namun, sebagian besar algoritma genetika baru tidak memiliki keaslian dan mirip dengan algoritma yang sudah ada seperti *particle swarm optimization* (PSO), algoritma genetika (GA), algoritma diferensial (DE), optimasi koloni semut (ACO), dan koloni lebah tiruan (ABC).

## 2.3 Tinjauan 3

**Judul** : *A Literature Review and Critical Analysis of Metaheuristics Recently Developed*

**Penulis** : Luis Velasco, Hector Guerrero dan Antonio Hospitaler

**Tahun** : 2024

**Jurnal** : Archives of Computational Methods in Engineering

**Tujuan** : Untuk mengetahui kondisi terkini dari masalah ini, makalah ini menganalisis sampel dari 111 penelitian terbaru yang mengusulkan apa yang disebut sebagai algoritma optimasi baru, hibrida, atau yang lebih baik. Di seluruh dokumen, topik-topik yang ditinjau akan dibahas dari perspektif umum hingga aspek-aspek spesifiknya.

**Metode** : Studi kepustakaan

**Pembahasan** : Dalam penelitiannya Velasco, Guerrero and Hospitaler (2024) mereviu hasil temuan dari 11 penelitian terbaru yang mengusulkan apa yang disebut sebagai algoritma optimasi baru, hibrida, atau yang lebih baik. Di seluruh dokumen, topik-topik yang ditinjau akan dibahas dari perspektif umum hingga aspek-aspek spesifiknya. Di antara temuan penelitian, terlihat bahwa hanya 43% dari makalah yang dianalisis yang menyebutkan teorema *No Free Lunch* (NFL), karena hasil yang signifikan ini diabaikan oleh sebagian besar penelitian yang menyajikan algoritma baru. Dari penelitian yang dianalisis, 65% mengirimkan versi yang lebih baik dari beberapa algoritma yang sudah ada, yang menunjukkan bahwa trennya tidak lagi mengusulkan metaheuristik berdasarkan analogi baru. Selain itu, kompilasi solusi yang ditemukan dalam masalah teknik yang biasa digunakan untuk memverifikasi kinerja algoritma mutakhir juga disajikan. Untuk menunjukkan bahwa algoritma dengan tingkat inovasi yang rendah dapat secara keliru dianggap

sebagai kerangka kerja baru selama bertahun-tahun, metaheuristik yang dikenal sebagai *Black Widow Optimization* dan *Coral Reef Optimization* dianalisis. Studi tentang komponen-komponennya mengungkapkan bahwa mereka tidak memiliki inovasi apa pun. Sebaliknya, mereka hanyalah campuran yang kurang dari operator evolusi yang berbeda. Hasil ini berlaku juga untuk versi perbaikan yang baru-baru ini diusulkan. Mereka menguraikan dalam beberapa subbab sebagai berikut:

1. Pendahuluan
2. *On the Interest and Motivation of New Metaheuristics*
  - a. *New, Combined, and Improved Algorithms*
  - b. *On Improved Algorithms*
3. *Performance and No Free Lunch (NFL) Theorem*
  - a. *No Free Lunch (NFL) Theorem*
  - b. *Criticism and Free Lunch Theorems*
4. *Types of Solved Problems*

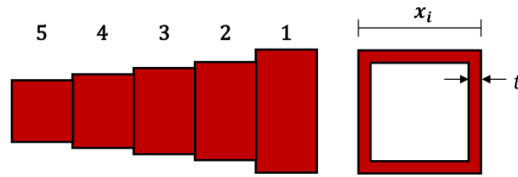
Sudah menjadi hal yang umum bagi algoritma-algoritma yang baru diusulkan untuk dikompertisikan dengan metaheuristik lain untuk menunjukkan kemampuan optimasi mereka. Untuk mempelajari lebih lanjut tentang praktik yang meluas ini, masalah yang digunakan untuk membandingkan kinerja algoritma dianalisis. Untuk analisis ini, artikel sampel dibagi menjadi empat kelompok: (1) studi yang berfokus pada penyelesaian masalah spesifik, (2) studi yang hanya menyelesaikan masalah perbandingan, (3) studi yang menyelesaikan masalah perbandingan dan rekayasa, dan (4) studi yang mempertimbangkan masalah perbandingan dan masalah spesifik.

a. *Engineering Problems*

Masalah teknik digunakan sebagai pelengkap dalam banyak penelitian untuk menunjukkan kemampuan optimasi algoritma pada masalah nyata. Enam masalah teknik yang umum ditemukan dalam literatur akan dianalisis secara rinci. Permasalahan tersebut adalah Permasalahan Desain Balok Kantilever, Permasalahan Desain Balok Lasan, Permasalahan Desain Bejana Tekan, Permasalahan Desain Pegas Tegangan/Kompresi, Permasalahan Desain Peredam Kecepatan, dan Permasalahan Desain Rangka 3 Batang.

i. *Cantilever Beam Design Problem*

Penelitian sebelumnya masalah Desain Balok Kantilever terdiri dari pendefinisian penampang balok sehingga beratnya dapat diminimalkan. Pada awalnya, masalah ini mempertimbangkan sepuluh variabel keputusan yang terdiri dari kedalaman dan lebar lima penampang. Saat ini, masalah ini telah disederhanakan menjadi lima variabel keputusan yang mewakili lebar ( $x_i$ ) dari lima penampang kotak kuadrat dengan ketebalan konstan ( $t$ ).



Gambar 4 Macam-macam Penampang Balok Kantilever

Tata letak masalah dan perbandingan solusi terbaik yang ditemukan oleh algoritma mutakhir diuraikan sebagai berikut:

Consider  $\bar{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$

Minimize  $f(\bar{x}) = 0,6224(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$

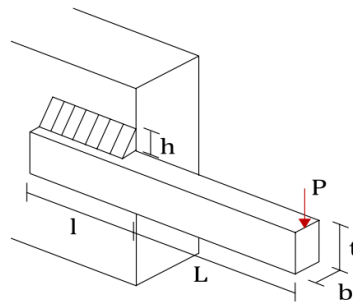
Subject to:

$$g_1(\bar{x}) = \frac{60}{x_1^3} + \frac{27}{x_2^3} + \frac{19}{x_3^3} + \frac{7}{x_4^3} + \frac{1}{x_5^3} - 1 \leq 0$$

Dimana:  $0,01 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \leq 100$

ii. *Welded Beam Design Problem*

Masalah Desain Balok dengan Las terdiri dari penentuan biaya minimum balok persegi panjang yang dilas. Soal ini mempertimbangkan berbagai batasan yang terkait dengan tegangan dan lendutan. *Decision variables* atau variabel keputusan dari masalah ini adalah ketebalan (t) dan panjang (l) las, dan dimensi penampang balok (b, h). Tata letak masalah dan perbandingan solusi terbaik yang ditemukan oleh algoritma yang ada saat ini dilihat sebagai berikut.



Gambar 5 Balok Kantilever dengan Sambungan Las



Consider  $\bar{x} = [h, l, t, b] = [x_1, x_2, x_3, x_4]$ .

Minimize  $f(\bar{x}) = 1.10471x_1^2x_2 + 0.04811x_3x_4(14 + x_2)$ .

Subject to:

$$\begin{aligned} g_1(\bar{x}) &= \tau(\bar{x}) - 13,600 \leq 0 \\ g_2(\bar{x}) &= \sigma(\bar{x}) - 30,000 \leq 0 \\ g_3(\bar{x}) &= x_1 - x_4 \leq 0 \\ g_4(\bar{x}) &= 0.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4(14 + x_2) - 5 \leq 0 \quad (11) \\ g_5(\bar{x}) &= \delta(\bar{x}) - 0.25 \leq 0 \\ g_6(\bar{x}) &= 6000 - p_c(\bar{x}) \leq 0 \end{aligned}$$

where:

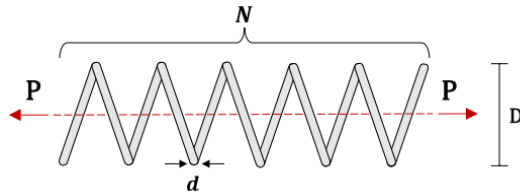
$$\begin{aligned} \tau(\bar{x}) &= \sqrt{(\tau')^2 + 2\tau'\tau''\frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2} \\ \tau' &= \frac{6000}{\sqrt{2}x_1x_2}; \quad \tau'' = \frac{MR}{J} \\ M &= 6000\left(14 + \frac{x_2}{2}\right); \quad R = \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2} \\ J &= \frac{2x_1x_2}{\sqrt{2}}\left(\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2\right) \\ \sigma(\bar{x}) &= \frac{504,000}{x_4x_3^2} \\ \delta(\bar{x}) &= \frac{65,856,000}{x_4x_3^3(30 \times 10^6)} \\ p_c(\bar{x}) &= \frac{4.013(30 \times 10^6)\sqrt{\frac{x_2^2x_4^6}{36}}}{196} \left(1 - \frac{x_3\sqrt{\frac{30 \times 10^6}{4(12 \times 10^6)}}}{28}\right) \end{aligned}$$

$$0.1 \leq x_1, x_4 \leq 2.0; 0.1 \leq x_2, x_3 \leq 10.0$$

iii. *Pressure Vessel Design Problem*

iv. *Tension/Compression Spring Design Problem*

Masalah Desain Pegas *Tension/Compression* terdiri dari meminimalkan berat pegas. Batasan dari masalah tersebut mempertimbangkan aspek-aspek seperti defleksi, tegangan geser, dan frekuensi lonjakan. Variabel keputusannya adalah diameter kawat ( $d$ ), diameter kumparan rata-rata ( $D$ ), dan jumlah kumparan ( $N$ ).



Gambar 6 Pegas

Consider  $\bar{x} = [d, D, N] = [x_1, x_2, x_3]$ .

Minimize  $f(\bar{x}) = x_1^2x_2(x_3 + 2)$ .

Subject to:

$$\begin{aligned}
g_1(\bar{x}) &= 1 - \frac{x_2^3 x_3}{71785 x_1^4} \leq 0 \\
g_2(\bar{x}) &= \frac{4x_2^2 - x_1 x_2}{12566(x_2 x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108 x_1^2} - 1 \leq 0 \\
g_3(\bar{x}) &= 1 - \frac{140.45 x_1}{x_2^2 x_3} \leq 0 \\
g_4(\bar{x}) &= \frac{x_1 + x_2}{1.5} \leq 0
\end{aligned}$$

where:

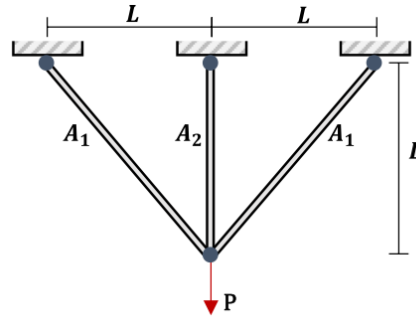
$$0.05 \leq x_1 \leq 2; \quad 0.25 \leq x_2 \leq 1.3; \quad 2 \leq x_3 \leq 15$$

v. *Speed Reducer Design Problem*

vi. *3-Bar Truss Design Problem*

Masalah Desain Rangka 3 Batang berusaha meminimalkan berat struktur logam yang memiliki batasan tegangan. Variabel penentu adalah luas penampang ( $A_1$ ,  $A_2$ ) dari elemen-elemen struktur. Solusi terbaik yang ditemukan oleh algoritma terbaru diuraikan sebagai berikut.

Di



Gambar 7 Struktur Rangka 3 Batang

Consider  $\bar{x} = [A_1, A_2] = [x_1, x_2]$ .

Minimize  $f(\bar{x}) = l(2\sqrt{2}x_1 + x_2)$ .

Subject to:

$$g_1(\bar{x}) = \sigma_1 = \frac{\sqrt{2}x_1 + x_2}{\sqrt{2x_1^2 + 2x_1x_2}} P \leq 2$$

$$g_2(\bar{x}) = \sigma_2 = \frac{1}{x_1 + \sqrt{2}x_2} P \leq 2$$

$$g_3(\bar{x}) = \sigma_3 = \frac{x_2}{\sqrt{2x_1^2 + 2x_1x_2}} P \leq 2$$

where:

$$0 \leq x_1, x_2 \leq 1; \quad L = 100 \text{ cm}; \quad P = 2 \text{ kN/cm}^2$$

b. *Observations on Engineering Problems*

5. *Black Widow and Coral Reef Optimization*

- a. *Black Widow Optimization*
- b. *Coral Reef Optimization*

## 6. *Discussion*

Penulis percaya bahwa kerangka kerja evaluasi yang tepat harus lebih didasarkan pada identifikasi kontribusi komponen-komponen algoritma daripada kinerja yang mereka capai pada masalah-masalah benchmark. Hal ini dikarenakan ada beberapa kasus di mana bahasa metafora digunakan untuk menyembunyikan formulasi yang sudah diketahui dan menampilkannya sebagai algoritma yang sama sekali baru. Dalam kasus seperti itu, algoritma “baru” akan berkinerja sama dengan algoritma yang ditirunya, sehingga membuat kerangka kerja evaluasi berbasis kinerja menjadi tidak mencerahkan. Selain itu, telah diketahui bahwa konfigurasi yang berbeda dari *hyperparameter algorithm* dapat menghasilkan kinerja yang berbeda. Hal ini, pada penelitian selanjutnya, dapat dieksplorasi untuk membuat sampel di mana algoritma yang dibandingkan menunjukkan kinerja yang buruk, sehingga menciptakan gambaran yang baik untuk algoritma baru yang diusulkan. Semua masalah ini dapat dihindari jika diskusi lebih berfokus pada kontribusi teoritis yang diberikan oleh algoritma baru daripada kompetisi antara kinerja mereka.

## 7. *Conclusions* (Kesimpulan)

Dalam makalah ini, sebuah analisis terhadap karakteristik yang disajikan oleh sampel dari 111 artikel terbaru di mana metaheuristik dideskripsikan sebagai “*new*”, “*novel*”, “*advanced*”, “*improved*”, atau serupa dilakukan. Berbagai aspek dipelajari, seperti jumlah kutipan yang diterima, asal usul algoritma pengoptimalan yang diusulkan, serta masalah yang mereka selesaikan. Kesimpulan yang berharga muncul dari analisis tersebut. Kesimpulan-kesimpulan tersebut adalah sebagai berikut:

- Saat ini terdapat kecenderungan untuk mengembangkan versi yang lebih baik dari algoritma yang sudah ada. Sayangnya, penelitian-penelitian ini menunjukkan tingkat inovasi yang kurang karena hanya menggabungkan kembali komponen-komponen pengoptimalan yang sudah terkenal.
- Nama-nama yang digunakan oleh para perancang algoritma untuk melabeli kreasi mereka tidak berfungsi untuk mendaftarkan fitur-fiturnya dengan jelas dan ringkas. Selain itu, mereka hanya menghasilkan bidang penelitian fiktif di mana algoritma yang diusulkan dibandingkan dengan algoritma lain yang memiliki nama yang sama, menghindari kerangka kerja yang kontras dengan ketelitian dan objektivitas ilmiah.
- Adalah umum bagi para perancang metaheuristik untuk memiliki pengetahuan yang terbatas tentang teorema NFL, yang pada gilirannya menyebabkan mereka secara keliru menggunakannya sebagai argumen yang mendukung pengajuan algoritma yang lebih kuat.

- Meskipun beberapa kasus mengizinkan adanya Teorema Makan Siang Gratis, mereka diabaikan begitu saja oleh para perancang metaheuristik, yang mewakili sebuah bidang penelitian yang belum dieksploitasi.
- Klaim algoritma yang terus menerus dengan kinerja yang luar biasa tampaknya lebih merupakan sumber daya literatur untuk membuat algoritma baru dipublikasikan daripada fakta. Hal ini terutama terlihat dari banyaknya versi “perbaikan” yang berusaha memperbaiki kekurangan yang ditunjukkan oleh algoritma yang pernah dianggap superior.
- Terlepas dari klaim bahwa metaheuristik baru yang diusulkan dapat memecahkan masalah “dunia nyata”, kenyataannya adalah bahwa masalah teknik yang mereka selesaikan masih jauh dari dapat diterapkan dalam situasi praktis yang nyata.
- Studi yang mengusulkan metaheuristik, baik yang baru maupun yang telah diperbaiki, mungkin telah mengalami proses peninjauan yang buruk.
- Dari tinjauan komponen-komponennya, terlihat bahwa beberapa algoritma, seperti *Black Widow Optimization* dan *Coral Reef Optimization*, tidak benar-benar inovatif tetapi lebih merupakan campuran operator evolusi yang tidak efisien. Lebih jauh lagi, hal ini mungkin juga berlaku untuk versi perbaikan yang baru saja dirilis.
- *Editor* dan *reviewer* perlu meningkatkan standar yang diperlukan untuk penelitian semacam ini agar hanya mengizinkan publikasi yang secara efektif menyajikan ide-ide inovatif yang memperkaya bidang penelitian.

Artikel pertama yang berjudul *Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review* merupakan kajian dari lima basis algoritma metaheuristik diantaranya *Evolution-based*, *Swarm intelligence-based* *Physics-based* *Human-related Hybrid*, *Evolution-based*, *Swarm intelligence-based* *Physics-based* *Human-related Hybrid* dan *Evolution-based* dimana Tomar, Bansal and Singh (2024) mengatakan penting untuk dicatat bahwa meskipun para peneliti telah mengembangkan banyak intuisi di balik algoritma ini, algoritma ini sebagian besar bekerja seperti “kotak hitam”. Jadi, sulit untuk memprediksi algoritma mana dalam bentuk tertentu yang dapat bekerja lebih baik untuk masalah optimasi. Tomar *et al.*, juga memberikan rumusan masalah seperti bagaimana parameter yang bergantung pada algoritma yang mempengaruhi kinerja algoritma, bagaimana MAs dapat beroperasi seefektif mungkin, berapa rasio ideal antara eksplorasi dan eksploitasi dan manfaat apa yang

diperoleh algoritma dari penggunaan memori algoritmik. Artikel kedua yang berjudul *An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges* menyajikan sebuah survei metaheuristik baru-baru ini. Kumpulan data untuk penelitian ini berisi sekitar 540 MA (*Metaheuristic Algorithms*). Studi ini menarik kesimpulan dari data statistik bahwa selama dekade terakhir, sekitar 38 MA muncul rata-rata setiap tahunnya. Namun, sebagian besar algoritma genetika baru tidak memiliki keaslian dan mirip dengan algoritma yang sudah ada seperti *particle swarm optimization* (PSO), algoritma genetika (GA), algoritma diferensial (DE), optimasi koloni semut (ACO), dan koloni lebah tiruan (ABC) potensial di masa depan untuk metaheuristik telah diidentifikasi. Artikel ketiga yang berjudul *A Literature Review and Critical Analysis of Metaheuristics Recently Developed* membuat kesimpulan dari 111 artikel yang direviu salah satunya saat ini terdapat kecenderungan untuk mengembangkan versi yang lebih baik dari algoritma yang sudah ada. Namun demikian, penelitian-penelitian ini menunjukkan tingkat inovasi yang kurang karena hanya menggabungkan kembali komponen-komponen pengoptimalan yang sudah terkenal.

Pada subab 2.4 diuraikan lebih jauh dengan melihat dari beberapa penelitian terdahulu.

## 2.4 Perbandingan Tinjauan

Perbandingan tinjauan diperoleh dengan proses seleksi dari semua publikasi jurnal dan prosiding. Proses pencarian menggunakan program *publish or perish* dengan kata kunci ("optimization algorithm" OR "algorithm") AND ("reinforced concrete" OR "frame" OR "concrete structure") untuk semua penelitian terkait optimasi struktur beton bertulang dan ("literature review" OR "novel" OR "new algorithm" OR "heuristic" OR "algorithm") AND ("truss structures" OR "civil engineering" OR "optimal design"). Hasil pencarian dapat dilihat pada Tabel 2 Perbandingan tinjauan.

Tabel 2 Perbandingan tinjauan

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
1.	(Prayogo <i>et al.</i> , 2018)	Optimasi Ukuran Penampang Rangka Batang Baja berdasarkan SNI 1729:2015 dengan Metode Metaheuristik <i>Symbiotic Organisms Search</i>	Penelitian ini menyelidiki metode metaheuristik baru bernama <i>symbiotic organisms search</i> (SOS) dalam mengoptimasi ukuran penampang rangka batang baja. Syarat batasan desain diadopsi dari spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural, SNI 1729:2015, yaitu rasio gaya terhadap kapasitas dan rasio kelangsingan batang.	Struktur rangka baja	<i>Symbiotic Organisms Search</i> (SOS)	Hasil simulasi dengan metode SOS ini kemudian akan dibandingkan terhadap tiga metode metaheuristik lainnya, yaitu <i>particle swarm optimization</i> , <i>differential evolution</i> , dan <i>teaching-learning-based optimization</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma SOS lebih superior dan mempunyai kemampuan konvergensi yang lebih baik dibandingkan dengan metode metaheuristik lainnya dalam menyelesaikan problem optimasi struktur rangka batang.
2.	(Hartono, Prayogo and Tjong, 2019)	Optimasi Topologi dan Ukuran Penampang Struktur Rangka Batang Baja	Melakukan proses optimasi topologi dan ukuran penampang struktur rangka batang dengan menggunakan SNI	Struktur rangka baja	PSO, DE, TLBO, SOS	Menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan ketiga algoritma lainnya untuk kelima kriteria massa tersebut. Untuk penelitian selanjutnya, penelitian ini dapat dikembangkan

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
		Dengan Metode Metaheuristik	1729:2015 pada studi kasus 24-bar truss			untuk optimasi struktur rangka batang baja yang mempertimbangkan faktor bentuk ( <i>shape</i> ) dari struktur rangka batang tersebut.
3.	(Adha, 2019)	Optimasi Pemakaian Material Struktur Dengan Optimasi Bentuk ( <i>Shape Optimization</i> ) dan <i>Cross Section</i> pada Struktur Rangka Batang Terhadap Kendala Reliabilitas Material Menggunakan Metode	Membandingkan metode optimasi struktur dengan modifikasi pada <i>cross section</i> dan modifikasi pada bentuk struktur ( <i>shape</i> ) dengan kombinasi <i>cross section</i> , untuk menahan beban struktur rencana dengan kendala-kendala tertentu.	Struktur rangka batang	metode algoritma genetik	Berdasarkan hasil analisa dapat di simpulkan, dengan menggunakan metode optimasi bentuk yang dikombinasikan dengan optimasi berat, maka didapat hasil optimasi struktur yang lebih baik.
4.	(Widjajanto, Giantara and Prayogo, 2020)	Optimasi Struktur Rangka Batang 3 Dimensi Berbasis Reliabilitas Dengan Menggunakan Metode Metaheuristik Dan	Memperbaiki kinerja struktur dengan mempertimbangkan ketidak pastian dan keacakan dilapangan dengan membandingkan 2 MAs.	Rangka batang 3 dimensi	Faktor keacakan → <i>reliability-based design optimization</i> (RBDO) dan Latin Hypercube Sampling  MAs → <i>Particle Swarm Optimization</i> dan <i>Symbiotic</i>	Hasil penelitian menunjukkan SOS memiliki performa lebih baik pada studi kasus 25-bar truss dan pada batasan sesuai SNI.

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
		<i>Latin Hypercube Sampling</i>			<i>Organisms Search. Algoritma-algoritma</i>	
5.	(Kalemci <i>et al.</i> , 2020)	<i>Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm</i>	Tujuan dari artikel ini adalah untuk mendesain dinding penahan tanah beton bertulang kantilever berbobot ringan dengan kunci geser dengan menggunakan algoritma optimasi yang diprogram dalam MATLAB	Dinding penahan tanah beton bertulang	<i>Grey Wolf Optimization (GWO)</i>	<i>menunjukkan bahwa algoritma GWO merupakan metode optimasi yang kompetitif untuk dinding penahan tuas canti RC dengan desain kunci geser</i>
6.	(Abualigah <i>et al.</i> , 2021)	<i>The Arithmetic Optimization Algorithm</i>	Kinerja AOA diperiksa pada dua puluh sembilan fungsi benchmark dan beberapa masalah desain teknik riil untuk menunjukkan penerapannya.	balok kantilever dengan sambungan las, pegas, masalah desain bejana tekan dan rangka 3 batang.	<i>Arithmetic Optimization Algorithm (AOA)</i>	Hasil eksperimen menunjukkan bahwa AOA memberikan hasil yang sangat baik dalam menyelesaikan masalah optimasi yang menantang dibandingkan dengan sebelas algoritma optimasi terkenal lainnya.
7.	(Jawad <i>et al.</i> , 2021)	<i>Sizing and layout optimization of</i>	Mengoptimalkan tata letak dan ukuran member	Struktur rangka baja	<i>Artificial Bee Colony (ABC)</i>	Efisiensi ABC diuji dalam empat masalah optimasi struktur benchmark.



No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
		<i>truss structures with artificial bee colony algorithm</i>	struktur rangka dengan batasan perpindahan, tegangan dan tekuk			Hasilnya menunjukkan dengan jelas keunggulan ABC dibanding algoritma lain dalam hal bobot yang dioptimalkan, deviasi standar, dan jumlah analisis struktur. ABC menunjukkan kinerja yang kuat dengan tingkat keberhasilan 100%.
8.	(Husada <i>et al.</i> , 2021)	Optimasi Desain Penampang Struktur Rangka Batang Baja Berbasis Reliabilitas Menggunakan <i>Symbiotic Organisms Search</i> dan <i>Artificial Neural Network</i>	Tujuan penelitian ini adalah ingin melihat efektivitas dari metode ANN dalam mengklasifikasikan status reliabilitas struktur berdasarkan nilai Pf untuk menggantikan peran metode MCS serta melihat performa optimasi antara metode SOS dan PSO dalam menyelesaikan permasalahan RBDO. Untuk	<i>10-bar planar truss</i>	Penelitian ini mengembangkan dua kerangka kerja hybrid RBDO, SOS-ANN dan PSO-ANN, yang menggabungkan metode metaheuristik, <i>Symbiotic Organisms Search (SOS)</i> dan <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> dengan metode machine learning, Artificial Neural Network (ANN).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SOS-ANN mengungguli metode PSO-ANN dalam hal kualitas solusi, efisiensi komputasi, dan konsistensi.
9.	(El-Kenawy <i>et al.</i> , 2022)	<i>Novel Meta-Heuristic Algorithm for</i>	<i>algoritma optimasi hibrida Sinus Cosinus Sine Cosine hybrid optimization</i>	Dua contoh yang diuji adalah desain	<i>Sine Cosine hybrid optimization algorithm with</i>	Hasilnya menekankan bahwa algoritma SCMWOA mengungguli beberapa algoritma optimasi

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
		<i>Feature Selection, Unconstrained Functions and Engineering Problems</i>	<i>algorithm with Modified Whale Optimization Algorithm (SCMWOA)</i> untuk memanfaatkan kekuatan WOA dan SCA untuk memecahkan masalah dengan variabel keputusan kontinu dan biner.	balok yang dilas dan desain pegas tegangan/kompresi.	Modified Whale Optimization Algorithm (SCMWOA)	komparatif dan memberikan akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma lainnya. Uji analisis statistik, termasuk analisis varian satu arah (ANOVA) dan Wilcoxon's rank-sum, mengkonfirmasi bahwa algoritme SCMWOA memiliki kinerja yang lebih baik.
10.	(Baghalzadeh Shishehgarkhaneh <i>et al.</i> , 2022)	<i>Application of Classic and Novel Metaheuristic Algorithms in a BIM-Based Resource Tradeoff in Dam Projects</i>	Optimasi antara komponen-komponen piramida kelangsungan hidup (waktu, biaya, kualitas, dan risiko) dalam proyek konstruksi diselesaikan dalam studi kasus bendungan penampung Ghocham dalam lima mode yang berbeda, termasuk penawaran kontraktor, BIM, aktual, dan dua mode lain berdasarkan pendapat ahli.	Proyek bendungan	lima algoritma optimasi meta-heuristik yang berbeda digunakan, termasuk dua algoritma klasik (Genetika dan <i>Simulated Annealing</i> ) dan tiga algoritma baru (Optimasi <i>Black Widow</i> , Optimasi <i>Battle Royale</i> , dan Optimasi <i>Black Hole Mechanics</i> )	Hasilnya menunjukkan kinerja yang cukup baik dari algoritma GA dan BHMO dalam beberapa skenario. Namun, hanya GA yang dapat dianggap sebagai algoritma yang efektif dalam tradeoff waktu-biaya-kualitas-risiko (TCQR) proyek konstruksi bendungan.
11.	(Furqan, Ramadhan Nasution and	Penerapan Algoritma <i>Artificial Bee</i>	Memudahkan pihak PDAM Tirtanadi mengambil keputusan dalam	Jalur pipa air bersih	Artificial Bee Colony (ABC)	Berdasarkan perhitungan dalam menentukan jalur pipa air bersih yang dilakukan menggunakan algoritma

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
	Khairunnisa, 2022)	<i>Colony Untuk Optimasi Rute Jalur Terpendek Distribusi Pipa Air Bersih Application</i>	menentukan titik lokasi pemasangan pipa air bersih yang akan didistribusikan ke rumah pelanggan			Artificial Bee Colony didapatkan hasil rute yang optimal yaitu $V1 \rightarrow V7 \rightarrow V4 \rightarrow V9 \rightarrow V8 \rightarrow V2 \rightarrow V6 \rightarrow V3 \rightarrow V5$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa algoritma Artificial Bee Colony mampu menentukan pencarian rute pipa distribusi air bersih pada PDAM Tirtanadi dan mampu memberikan solusi pencarian rute terpendek yang lebih baik.
12.	(Tunca and Çarbaş, 2022)	<i>Minimum weight design of reinforced concrete beams utilizing grey wolf and backtracking search optimization algorithms</i>	<i>Tujuan dari optimasi ini adalah untuk mendapatkan desain berat minimum balok beton bertulang di bawah beban terdistribusi dan beban dua titik</i>	<i>Balok beton bertulang tertumpu sederhana</i>	<i>algoritma optimasi grey wolf (GW) dan backtracking search (BS) dipilih sebagai pengoptimal.</i>	<i>Temuan optimal dari algoritma optimasi menunjukkan bahwa algoritma GW sedikit lebih kuat pada fase eksploitasi, sedangkan algoritma BS lebih kuat pada fase eksplorasi. Selain itu, dapat disimpulkan dari desain balok yang optimal bahwa algoritma GW lebih layak untuk meminimalkan desain balok beton bertulang.</i>
13.	(Khajeh <i>et al.</i> , 2023)	<i>Weight minimization of truss structures using an improved Harris hawks optimization algorithm</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan struktur rangka batang dengan menggunakan algoritma optimasi Harris hawks (IHHO) yang telah ditingkatkan. Persamaan	5 struktur rangka batang dengan 10, 25, 72, 200, dan 942 member dipilih untuk dioptimasi.	algoritma optimasi Harris hawks (IHHO) yang telah ditingkatkan. Persamaan algoritma HHO	Dibandingkan dengan hasil algoritma HHO, algoritma IHHO memiliki tingkat konvergensi yang lebih tinggi dan memberikan solusi yang lebih baik. Selain itu, dibandingkan dengan algoritma lain, pendekatan hibrida ini

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
			algoritma HHO dimodifikasi untuk meningkatkan proses optimasinya.			akan memberikan hasil yang lebih baik.
14.	(Lee <i>et al.</i> , 2023)	<i>Weight Optimization of Discrete Truss Structures Using Quantum-Based HS Algorithm</i>	Memperkenalkan bidang baru yang menggabungkan algoritma metaheuristik dan komputasi kuantum telah dibuat dan diterapkan pada masalah optimasi di berbagai bidang.	Struktur Rangka 24 batang dan 72 batang	Algoritma metaheuristik dan komputasi kuantum	Algoritma QbHS menghasilkan bobot yang lebih rendah daripada QEA (algoritma evolusi yang terinspirasi oleh kuantum) dan mengkonfirmasi bahwa kinerja konvergensi lebih baik.
15.	(Goodarzimehr, 2023)	<i>Bonobo optimizer algorithm for optimum design of truss structures with static constraints</i>	Algoritma Bonobo Optimizer (BO) untuk optimasi rangka batang dengan beban statik	5 Struktur rangka batang	Algoritma Bonobo Optimizer (BO)	Hasilnya jelas menunjukkan bahwa algoritma BO merupakan teknik pencarian dan optimasi yang kuat untuk struktur rangka batang yang dibebani oleh batasan statis untuk variabel diskrit dan kontinu.
16.	(Kaveh and Yousefpour, 2023)	<i>Comparison of Three Chaotic Meta-heuristic Algorithms for the Optimal Design of Truss Structures with Frequency Constraints</i>	Memperkenalkan peta chaos dalam algoritma metaheuristik dalam mengoptimalkan struktur dengan batasan frekuensi natural	Struktur dome rangka 52 batang, 120 batang dan struktur planar 200 batang	<i>Three Chaotic Meta-heuristic Algorithms</i>	Dalam masalah optimasi berdasarkan batasan frekuensi dan variabel bentuk, fungsi chaos telah menyebabkan peningkatan yang signifikan.

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
17.	(Tao <i>et al.</i> , 2023)	<i>Shape and Size Optimization of Truss Structures under Frequency Constraints Based on Hybrid Sine Cosine Firefly Algorithm</i>	Mengoptimasi struktur rangka batang dengan algoritma <i>firefly sinus cosinus hibrida (HSCFA)</i>	Struktur rangka 72 batang, struktur dom 120 batang, struktur dom 52 batang dan struktur rangka 37 batang	<i>algoritma firefly sinus cosinus hibrida (HSCFA)</i>	kinerja HSCFA ditunjukkan melalui contoh numerik dengan massa nonstruktural dan kendala frekuensi. Hasilnya menunjukkan bahwa HSCFA adalah alat yang efisien dan kompetitif untuk masalah optimasi bentuk dan ukuran dengan kendala frekuensi.
18.	(Işık <i>et al.</i> , 2023)	<i>A Hybrid Artificial Neural Network—Particle Swarm Optimization Algorithm Model for the Determination of Target Displacements in Mid-Rise Regular Reinforced-Concrete Buildings</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model berkelanjutan berbasis jaringan syaraf tiruan (artificial neural network/ANN) untuk memprediksi target perpindahan di bawah risiko seismik yang berbeda untuk bangunan beton bertulang biasa bertingkat menengah, yang merupakan bagian besar dari stok bangunan yang ada saat ini, dengan menggunakan semua data yang diperoleh.	Struktur Gedung Bertingkat 4, 5, 6, 7 dan 8 lantai.	<i>A Hybrid Artificial Neural Network dan Particle Swarm Optimization Algorithm</i>	Ditemukan bahwa JST yang dibentuk dengan partikel dengan posisi terbaik yang ditunjukkan oleh model hibrida menghasilkan hasil yang sukses dalam penghitungan skor kinerja. Model hibrida yang dibuat menghasilkan 99% hasil yang sukses dalam estimasi DL, 99% dalam estimasi SD, dan 99% dalam estimasi NC dalam menentukan perpindahan target pada bangunan beton bertulang biasa bertingkat menengah. Model hibrida juga menunjukkan parameter mana yang harus digunakan dalam JST untuk mengestimasi target perpindahan di bawah risiko gempa yang berbeda.

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
19.	(Yücel, Nigdeli and Bekdaş, 2024)	<i>Optimization of Truss Structures by Using a Hybrid Population-Based Metaheuristic Algorithm</i>	Optimisasi struktur rangka batang dengan 3 MAs	rangka ruang 25 batang dan 72 batang	Penelitian ini menggunakan 3 algoritma: <i>flower pollination algorithm</i> , <i>Jaya algorithm</i> dan <i>the hybrid algorithm</i>	hasil penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh versi algoritma metaheuristik yang diusulkan secara umum berhasil dan efektif untuk meminimalkan fungsi obyektif dibandingkan dengan algoritma yang digunakan dalam penelitian sebelumnya.
20.	(Etaati <i>et al.</i> , 2024)	<i>Shape and sizing optimisation of space truss structures using a new cooperative coevolutionary-based algorithm</i>	Optimasi bentuk → optimasi ukuran batang → optimasi keseluruhan	2 struktur rangka berskala besar	Optimasi bentuk dan ukuran rangka batang → <i>Cooperative Coevolutionary marine predators algorithm combined with a greedy search (CCMPA-GS)</i>	<p>1. (CCMPA-GS) lebih baik dibandingkan dengan 13 algoritma optimasi meta-heuristik genetik, evolusioner, swarm, dan memetic yang sudah ada.</p> <p>2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode CCMPA-GS yang diusulkan secara konsisten mengungguli metode meta-heuristik lainnya, menghasilkan desain optimal untuk struktur rangka batang 314-bar</p> <p>3. dan 260-bar yang masing-masing lebih unggul 52% dan 63,4%. Hal ini menandakan peningkatan substansial dalam kinerja optimasi, menyoroti potensi CCMPA-GS sebagai alternatif</p>

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
						yang kuat dalam bidang optimasi struktur.
21.	(SeyedOskouei et al., 2024)	<i>Shape and size optimization of truss structure by means of improved artificial rabbits optimization algorithm</i>	menggunakan algoritma <i>artificial rabbit optimization (ARO)</i> metaheuristik baru untuk desain bentuk dan ukuran struktur rangka yang optimal, <b>dimana frekuensi natural sebagai acuan.</b>	lima struktur rangka batang acuan yang terkenal dengan 10, 37, 52, 72, dan 120 batang ditentukan	<i>artificial rabbit optimization (ARO)</i>	I-ARO terbukti mampu memberikan hasil yang lebih baik daripada ARO standar dan pendekatan lain dalam literatur. Hal ini menunjukkan kemampuan metode inisialisasi DLU dalam meningkatkan kinerja algoritma I-ARO.
22.	(Zhou, 2024)	<i>Optimization design of steel frame structure based on multi-population genetic algorithm</i>	makalah ini memperkenalkan kolaborasi multi-populasi dan mekanisme berbagi informasi untuk memperbaiki masalah tersebut dan penerapannya dalam desain optimasi struktural dipelajari. Dimana beban gempa statik menjadi input pada struktur tersebut.	Struktur Rangka baja	<i>multi-population genetic algorithm</i>	menunjukkan bahwa algoritma genetika multi-populasi dapat meningkatkan ketergantungan hasil optimasi pada parameter algoritma dan efisiensi desain optimasi struktural.
23.	(Carvalho et al., 2024)	<i>Multi-objective structural optimization for the automatic member grouping</i>	Makalah ini bertujuan untuk memformulasikan masalah optimasi struktur multi-objektif untuk menemukan	Struktur rangka batang	16 algoritma evolusioner multi-objektif diadopsi untuk menyelesaikan	Memungkinkan menemukan konfigurasi struktur dengan pengelompokan asli berdasarkan simetri yang ditentukan.

No .	Penulis (Author)	Judul	Tujuan Penelitian	Objek Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian
		<i>of truss structures using evolutionary algorithms</i>	pengelompokan anggota struktur rangka batang yang terbaik.		masalah optimasi yang diusulkan	
24	(Pan <i>et al.</i> , 2024)	<i>Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems</i>	Menyempurnakan Algoritma ABC ( <i>algorithm bee colony</i> )	Iris mata, Kaca, WBC, Anggur, Kebun Binatang, Dermatologi dan Ragi	improved ABC algorithm	Hasil eksperimen menunjukkan bahwa algoritma KLABC mencapai konvergensi yang lebih cepat dibandingkan dengan algoritma ABC tradisional, dengan peningkatan kinerja rata-rata sebesar 55,63%. Selain itu, ketika membandingkan runtime algoritma yang berbeda dalam menangani data berskala besar, algoritma KLABC secara efektif mempertahankan kinerjanya bahkan dalam skenario dengan ukuran data yang lebih besar
25.	(Tunca and Carbas, 2024)	<i>Design cost minimization of a reinforced concrete column section using overnew swarm-based optimization algorithms</i>	<i>Penelitian ini berfokus pada meminimalkan biaya desain terutama masalah desain kolom beton bertulang yang diusulkan melalui tiga pengoptimal berbasis swarm yang baru seperti Coati Optimization Algorithm, Fox Optimizer dan Pelican Optimization Algorithm (POA)</i>	<i>Struktur Kolom Beton Bertulang</i>	<i>Coati Optimization Algorithm, Fox Optimizer dan Pelican Optimization Algorithm (POA)</i>	<i>Di antara ketiga algoritma tersebut, POA menunjukkan kinerja solusi desain algoritmik yang paling baik.</i>



<b>No .</b>	<b>Penulis (Author)</b>	<b>Judul</b>	<b>Tujuan Penelitian</b>	<b>Objek Penelitian</b>	<b>Metode yang Digunakan</b>	<b>Hasil Penelitian</b>
<b>N</b>	<b>Penelitian yang Diusulkan</b>	<b>Pengembangan Metode dan Algoritma Metaheuristik untuk Optimasi Desain Struktur Bangunan</b>	<b>Diharapkan dapat memperoleh kerangka/metode optimasi dengan mengembangkan algoritma Metaheuristik yang bersifat “baru”</b>	<b>Bangunan Teknik Sipil</b>	<b>Algoritma Metaheuristik</b>	<b>Algoritma yang diperoleh mampu mengoptimalkan desain struktur bangunan dibidang Teknik Sipil</b>

Tabel 2 Perbandingan tinjauan menguraikan 25 penelitian yang terseleksi berkaitan pengembangan algoritma metaheuristik untuk optimasi dari tahun 2018 sampai dengan 2024. Tabel 2 Perbandingan tinjauan menunjukkan sebanyak 20 artikel membahas tentang optimasi pada struktur rangka batang dengan material penyusun baja dan sebanyak 5 artikel yang membahas optimasi untuk struktur beton bertulang. Dapat dipahami bahwa penelitian terkait optimasi terhadap desain struktur bangunan dibagi dalam 3 kategori yaitu pertama optimasi terhadap topologi/tata letak seperti yang uraikan oleh (Hartono, Prayogo and Tjong, 2019), (Jawad et al., 2021), (Furqan, Ramadhan Nasution and Khairunnisa, 2022), (Goodarzimehr, 2023). Kedua optimasi terhadap ukuran penampang seperti yang diuraikan oleh (Prayogo et al., 2018) (Hartono, Prayogo and Tjong, 2019), (Kalemci et al., 2020), (Jawad et al., 2021), (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al., 2022), (Tunca and Çarbaş, 2022) dll. Ketiga optimasi terhadap bentuk dari penampang seperti yang diuraikan oleh (SeyedOskouei et al., 2024), (Etaati et al., 2024), (Tao et al., 2023), (Adha, 2019) dll. Selain itu beberapa penelitian diantaranya (Abualigah et al., 2021), (El-Kenawy et al., 2022) dan (Pan et al., 2024) dalam tujuannya lebih fokus mengembangkan dan mengimplementasikan struktur algoritma dalam penelitiannya.

Hal tersebut sejalan dengan (Tomar, Bansal and Singh, 2024) yang mengatakan kedepan penelitian dapat mengeksplorasi pengembangan varian biner dari algoritma metaheuristic karena penelitian yang ada terfokus pada dua hal yaitu memaksimalkan akurasi dan meminimalkan fitur. Rajwar, Deep and Das (2023) juga mengatakan sekitar 38 MAs muncul dan menekankan dalam membangun algoritma Metaheuristik untuk mencari keseimbangan antara eksploitasi dan eksplorasi untuk mencapai kinerja terbaik. Velasco, Guerrero and Hospitaler (2024) dengan mereviu 11 penelitian dari 111 artikel yang mengusulkan algoritma hibrida (hybrid algorithms) dan dari penelitian yang dianalisis, 65% mengirimkan versi yang lebih baik dari beberapa algoritma yang sudah ada, yang menunjukkan bahwa trennya tidak lagi mengusulkan metaheuristik berdasarkan analogi baru.

Dalam baris terakhir pada Tabel 2 penulis mengusulkan judul “Pengembangan Metode dan Algoritma Metaheuristik untuk Optimasi Desain

Struktur Bangunan” dengan harapan dapat mengembangkan algoritma hibrida “baru” dimana objek penelitian berupa struktur bangunan. Dalam hal ini penulis belum menentukan tipe struktur yang akan menjadi objek penelitian, namun berdasarkan penelitian yang diperoleh struktur beton bertulang masih berpeluang besar untuk diteliti karena terdapat *gap* jumlah penelitian dibanding penelitian dengan objek struktur rangka batang. Penulis menduga struktur beton bertulang yang menggabungkan bahan beton dengan tulangan baja lebih kompleks dijadikan objek penelitian karena struktur tersebut merupakan material komposit dengan nilai Modulus Elastisitas yang berbeda.

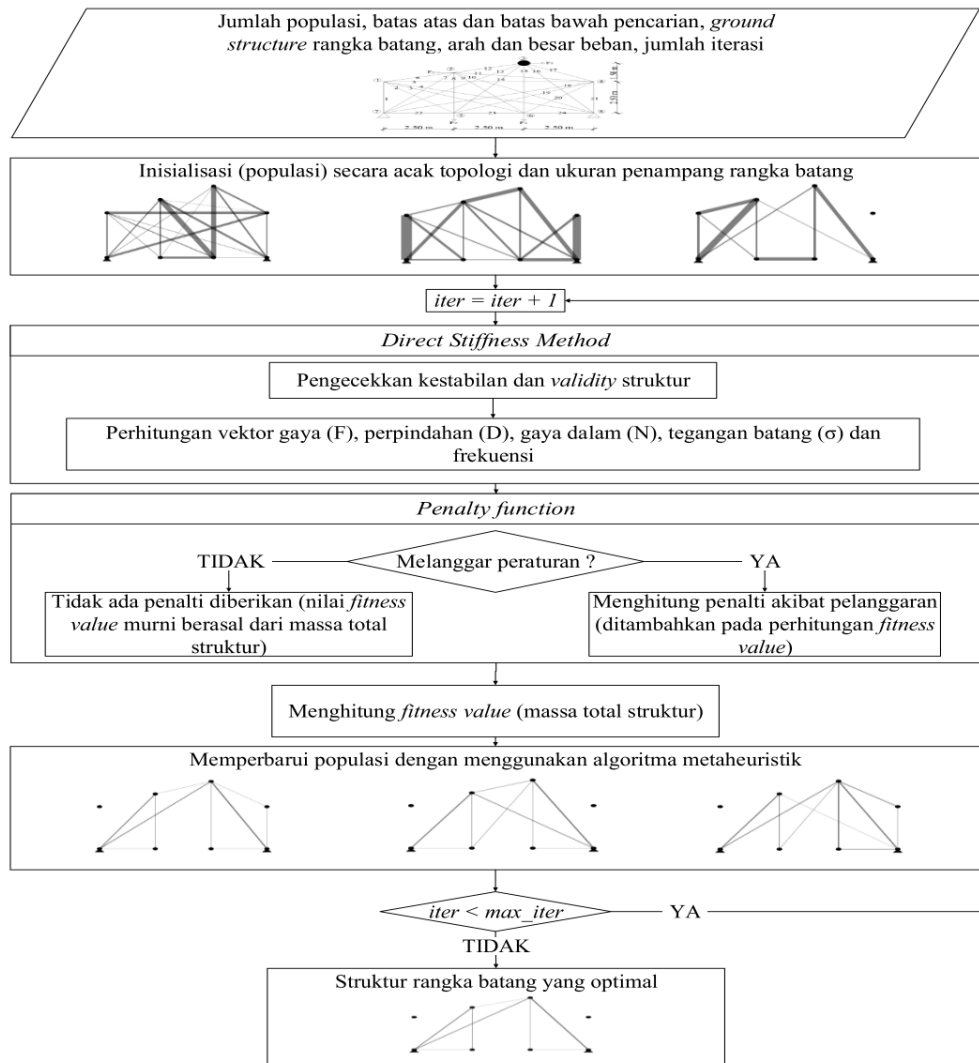
### **3 Metodologi**

#### **3.1 Motivasi**

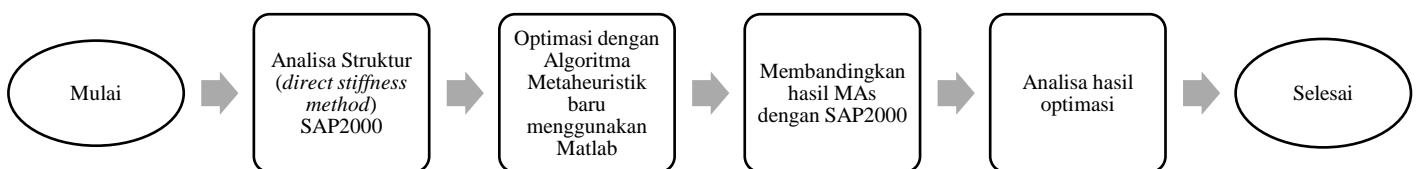
Motivasi dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan desain struktur yang optimal sehingga dapat memperoleh biaya atau harga yang murah tetapi tetap mampu bertahan menahan beban yang bekerja sesuai kriteria perancangan yang diatur dalam standar.

#### **3.2 Framework Riset**

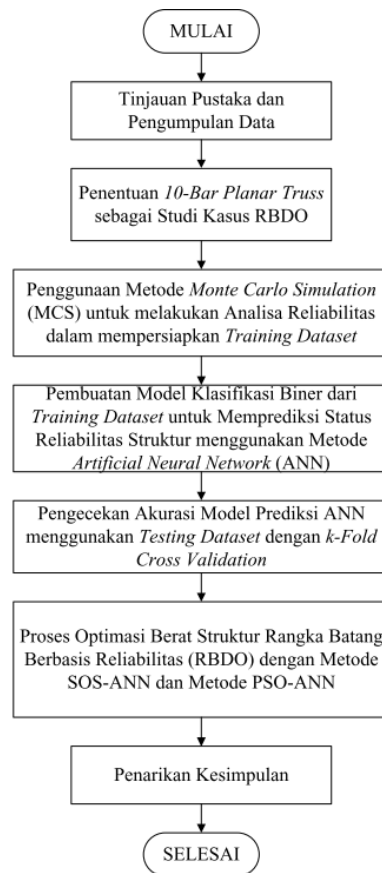
Kerangka kerja penelitian untuk optimasi topologi mengadopsi dari penelitian Suryo et al., (2016) yang ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9 menunjukkan alur penelitian dan kerangka kerja penelitian untuk optimasi pada penampang struktur yang mengadopsi penelitian Husada et al., (2021).



Gambar 8 Diagram Alir Optimasi Topologi dan Ukuran Penampang Struktur Rangka Batang  
Sumber: Suryo et al., (2016)



Gambar 9 Alur Penelitian



Gambar 10 Diagram Alir Optimasi Penampang Struktur Rangka Batang Berbasis Reliabilitas

Sumber: Husada et al., (2021)

### 3.3 Pendekatan

Konsep pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan algoritma Metaheuristik. 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 (Putra, Joseph and Tjong, 2015).

## 4 Daftar Pustaka

Abualigah, L. *et al.* (2021) ‘The Arithmetic Optimization Algorithm’, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 376, p. 113609. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>.

Adha, A. (2019) ‘Optimasi Pemakaian Material Struktur dengan Optimasi Bentuk (Shape Optimization) dan Cross Section pada Struktur Rangka Batang Terhadap Kendala Reliabilitas Material Menggunakan Metode Algoritma Genetik’, *SPECTA Journal of Technology*, 2(2), pp. 61–68. Available at: <https://doi.org/10.35718/specta.v2i2.107>.

Anne-Wil Harzing (2017) *Explains the use of Publish or Perish and its metrics*. Available at: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>.

Aslam Kassimali (2010) *Matrix Analysis of Structures*. 2nd edn. United States of America: Cengage Learning.

Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, M. *et al.* (2022) ‘Application of Classic and Novel Metaheuristic Algorithms in a BIM-Based Resource Tradeoff in Dam Projects’, *Smart Cities*, 5(4), pp. 1441–1464. Available at: <https://doi.org/10.3390/smartcities5040074>.

Carvalho, J.P.G. *et al.* (2024) ‘Multi-objective structural optimization for the automatic member grouping of truss structures using evolutionary algorithms’, *Computers & Structures*, 292, p. 107230. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107230>.

Denney, A.S. and Tewksbury, R. (2013) ‘How to Write a Literature Review’, *Journal of Criminal Justice Education*, 24(2), pp. 218–234. Available at: <https://doi.org/10.1080/10511253.2012.730617>.

El-Kenawy, E.-S.M. *et al.* (2022) ‘Novel Meta-Heuristic Algorithm for Feature Selection, Unconstrained Functions and Engineering Problems’, *IEEE Access*, 10, pp. 40536–40555. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166901>.

Etaati, B. *et al.* (2024) ‘Shape and sizing optimisation of space truss structures using a new cooperative coevolutionary-based algorithm’, *Results in Engineering*, 21, p. 101859. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101859>.

Furqan, M., Ramadhan Nasution, Y. and Khairunnisa (2022) ‘Penerapan Algoritma Artificial Bee Colony Untuk Optimasi Rute Jalur Terpendek Distribusi Pipa Air Bersih Application of Artificial Bee Colony Algorithm to Optimize The Shortest Route to Distribute Clean Water Pipes Article Info ABSTRAK’, *JOMLAI: Journal of Machine Learning and Artificial Intelligence*, 1(2), pp. 2828–9099. Available at: <https://doi.org/10.55123/jomlai.v1i2.768>.

Gere, J.M. (2004) *Mechanics of Materials*. Sixth Edit. Edited by J. Ruggiero. United States of America: Bill Stenquist.

Goodarzimehr, V. (2023) ‘Bonobo optimizer algorithm for optimum design of truss structures with static constraints’, *Structures*, 50, pp. 400–417. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.023>.

Hartono, R.A., Prayogo, D. and Tjong, W.F. (2019) ‘OPTIMASI TOPOLOGI DAN UKURAN PENAMPANG STRUKTUR RANGKA BATANG BAJA DENGAN METODE METAHEURISTIK’, *Dimensi Utama Teknik Sipil*, 6(1), pp. 33–42. Available at: <https://doi.org/10.9744/duts.6.1.33-42>.

Hibbeler, R.C. (2020) *STRUCTURAL ANALYSIS*. 10th edn. Edited by S. Patra. United Kingdom: Pearson Education Limited. Available at: [www.pearsonglobaleditions.com](http://www.pearsonglobaleditions.com).

Husada, W. *et al.* (2021) ‘Optimasi Desain Penampang Struktur Rangka Batang Baja Berbasis Reliabilitas Menggunakan Symbiotic Organisms Search Dan Artificial Neural Network’, 15(3), pp. 214–221.

Işık, M.F. *et al.* (2023) ‘A Hybrid Artificial Neural Network—Particle Swarm Optimization Algorithm Model for the Determination of Target Displacements in Mid-Rise Regular Reinforced-Concrete Buildings’, *Sustainability*, 15(12), p. 9715. Available at: <https://doi.org/10.3390/su15129715>.

Jawad, F.K.J. *et al.* (2021) ‘Sizing and layout optimization of truss structures with artificial bee colony algorithm’, *Structures*, 30(May 2020), pp. 546–559. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.016>.

Kalemci, E.N. *et al.* (2020) ‘Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm’, *Structures*, 23, pp. 245–253. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013>.

Kaveh, A. and Yousefpour, H. (2023) ‘Comparison of Three Chaotic Meta-heuristic Algorithms for the Optimal Design of Truss Structures with Frequency Constraints’, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(4), pp. 1130–1151. Available at: <https://doi.org/10.3311/PPci.22594>.

Khajeh, A. *et al.* (2023) ‘Weight minimization of truss structures using an improved Harris hawks optimization algorithm’, *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), p. 112. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01055-3>.

Khodadadi, N. *et al.* (2023) ‘A comparison performance analysis of eight meta-heuristic algorithms for optimal design of truss structures with static constraints’, *Decision Analytics Journal*, 8(June), p. 100266. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100266>.

Lee, S. *et al.* (2023) ‘Weight Optimization of Discrete Truss Structures Using

Quantum-Based HS Algorithm', *Buildings*, 13(9), p. 2132. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings13092132>.

Mortazavi, A. (2020) 'A new fuzzy strategy for size and topology optimization of truss structures', *Applied Soft Computing Journal*, 93, p. 106412. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106412>.

Oktaviani, M. *et al.* (2023) 'Method of Calculating the Forces on the 2D / 3D Truss : A Review Jurnal Review : Metode Perhitungan Gaya-gaya pada Truss 2D / 3D', pp. 433–446.

Pan, X. *et al.* (2024) 'Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems ☆', *Alexandria Engineering Journal*, 86(October 2023), pp. 669–679. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.011>.

Pan, Y. and Zhang, L. (2021) 'Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends', *Automation in Construction*, 122(October 2020), p. 103517. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>.

Prayogo, D. *et al.* (2018) 'Optimasi Ukuran Penampang Rangka Batang Baja berdasarkan SNI 1729:2015 dengan Metode Metaheuristik Symbiotic Organisms Search', *Jurnal Teknik Sipil*, 25(1), p. 41. Available at: <https://doi.org/10.5614/jts.2018.25.1.6>.

Putra, R.E., Joseph, J. and Tjong, W.F. (2015) 'Optimasi Desain Struktur Rangka Batang Berskala Besar Dengan Metode Metaheuristik', pp. 273–280.

Rajwar, K., Deep, K. and Das, S. (2023) 'An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges', *Artificial Intelligence Review*, 56(11), pp. 13187–13257. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>.

SeyedOskouei, S.L. *et al.* (2024) 'Shape and size optimization of truss structure by means of improved artificial rabbits optimization algorithm', *Engineering Optimization*, pp. 1–30. Available at: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2308577>.

Suryo, H.E. *et al.* (2016) 'BATANG DENGAN METODE METAHEURISTIK'.

Talatahari, S. *et al.* (2012) 'OPTIMIZATION OF SKELETAL STRUCTURAL USING ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM', 2(4), pp. 557–571.

Tao, R. *et al.* (2023) 'Shape and Size Optimization of Truss Structures under Frequency Constraints Based on Hybrid Sine Cosine Firefly Algorithm', *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 134(1), pp. 405–428. Available



at: <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.020824>.

Tomar, V., Bansal, M. and Singh, P. (2024) ‘Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review’, in *RAiSE-2023*. Basel Switzerland: MDPI, p. 238. Available at: <https://doi.org/10.3390/engproc2023059238>.

Tunca, O. and Carbas, S. (2024) ‘Design cost minimization of a reinforced concrete column section using overnew swarm-based optimization algorithms’, *Neural Computing and Applications* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09998-z>.

Tunca, O. and Çarbaş, S. (2022) ‘Minimum weight design of reinforced concrete beams utilizing grey wolf and backtracking search optimization algorithms’, *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13(2), p. 72. Available at: <https://doi.org/10.20528/cjcr.2022.02.003>.

Velasco, L., Guerrero, H. and Hospitaler, A. (2024) ‘A Literature Review and Critical Analysis of Metaheuristics Recently Developed’, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(1), pp. 125–146. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09975-0>.

Widjajanto, D.N., Giantara, R. and Prayogo, D. (2020) ‘Optimasi Struktur Rangka Batang 3 Dimensi Berbasis Reliabilitas Dengan Menggunakan Metode Metaheuristik Dan Latin Hypercube Sampling’, pp. 188–195.

Yücel, M., Nigdeli, S.M. and Bekdaş, G. (2024) ‘Optimization of Truss Structures by Using a Hybrid Population-Based Metaheuristic Algorithm’, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), pp. 5011–5026. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08319-1>.

Zhou, J. (2024) ‘Optimization design of steel frame structure based on multi-population genetic algorithm’, *Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao/Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(1), pp. 71–81. Available at: <https://doi.org/10.11835/j.issn.2096-6717.2022.071>.