



Optimasi Desain Kolom Beton Bertulang Berdasarkan Biaya Minimum Menggunakan Genetic Algorithm Berbasis Python

Pandu Rinaldi Nababan, Agung Budiwirawan

Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

miixm3054@students.unnes.ac.id

Abstrak

Perancangan kolom beton bertulang dalam rekayasa struktur umumnya masih menggunakan metode konvensional berbasis iterasi yang cenderung belum optimal secara ekonomi akibat keterbatasan dalam mengeksplorasi variasi desain. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi biaya minimum pada kolom beton bertulang persegi dengan memanfaatkan Genetic Algorithm (GA) yang diimplementasikan menggunakan Python 3.12. Variabel desain bersifat diskrit dan disesuaikan dengan praktik lapangan, meliputi mutu beton (f_c') sebesar 25 dan 30 MPa, dimensi penampang (b dan h) antara 400–800 mm, diameter tulangan longitudinal {10; 13; 16; 19} mm, diameter sengkang {10; 13; 16} mm, jumlah tulangan 4–20 batang, serta jarak sengkang 100–250 mm. Fungsi objektif adalah meminimalkan biaya total material (beton dan baja tulangan) dengan batasan struktural berdasarkan SNI 2847:2019, mencakup kapasitas aksial, interaksi lentur P – M , geser, rasio tulangan (1–8%), dan kelangsingan kolom. Algoritma dijalankan 15 kali dengan kondisi pembebanan $P_u = 1.471$ kN, $M_u = 187,5$ kNm, dan $V_u = 504,542$ kN. Hasil optimasi terbaik menunjukkan biaya minimum Rp 5.343.471 dengan konfigurasi $f_c' = 25$ MPa, dimensi 400×540 mm, 18 batang D13 longitudinal, dan sengkang D13 spasi 100 mm. Dibandingkan metode konvensional berbasis Excel, GA menghasilkan solusi lebih representatif karena mampu mengeksplorasi ruang solusi yang jauh lebih luas.

Kata kunci: Algoritma Genetika; Kolom Beton Bertulang; Optimasi Struktur; Minimasi Biaya; Python; SNI 2847:2019

1. Latar Belakang

Kolom beton bertulang merupakan elemen struktur vertikal utama yang memikul beban aksial, lentur, dan geser pada bangunan. Kegagalan pada elemen ini berpotensi memicu keruntuhan berantai sehingga aspek keandalan dan efisiensi desain tidak dapat dikompromikan. Proses perancangan kolom secara konvensional dilakukan melalui pendekatan iteratif berdasarkan standar perencanaan yang berlaku, namun pendekatan tersebut hanya mampu mengevaluasi kombinasi variabel desain dalam jumlah terbatas sehingga solusi yang diperoleh tidak selalu optimal secara ekonomis [1].

Perkembangan teknologi komputasi mendorong penerapan metode optimasi metaheuristik dalam rekayasa struktur. Algoritma Genetika (Genetic Algorithm/GA) telah terbukti efektif menyelesaikan permasalahan optimasi kombinatorial dengan ruang solusi yang luas dan variabel bersifat diskrit [2], [3]. Metode ini terinspirasi dari prinsip evolusi biologis dan beroperasi melalui mekanisme seleksi alam, crossover, serta mutasi untuk menghasilkan solusi yang semakin baik dari generasi ke generasi.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan GA dalam optimasi elemen beton bertulang. Menezes et al. [4] menunjukkan bahwa GA mampu mengoptimalkan dimensi dan konfigurasi tulangan kolom secara efisien dibandingkan metode konvensional. Quéva et al. [5] mengkonfirmasi efektivitas GA pada permasalahan desain struktural yang kompleks. Heydari et al. [6] memperluas kajian dengan mempertimbangkan batasan lendutan dan kapasitas elemen secara simultan. Di lingkup nasional, Levia Budiman dan Vanhalen [7] menunjukkan bahwa optimasi berbasis algoritma mampu meningkatkan efisiensi material tanpa mengorbankan keamanan struktur.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut belum secara spesifik mengintegrasikan variabel desain diskrit yang sesuai dengan praktik konstruksi lapangan serta fungsi objektif biaya berbasis harga material aktual menurut Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP). Kesenjangan inilah yang menjadi motivasi utama penelitian

ini. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi desain kolom beton bertulang persegi dengan fungsi objektif minimasi biaya material menggunakan GA berbasis Python, serta membandingkan hasil optimasi dengan pendekatan perhitungan konvensional untuk mengevaluasi keunggulan masing-masing metode.

Selain aspek keamanan struktur, efisiensi biaya juga menjadi salah satu pertimbangan utama dalam proses perencanaan elemen beton bertulang. Biaya pekerjaan struktur umumnya menyumbang proporsi yang cukup besar terhadap total biaya konstruksi suatu bangunan. Oleh karena itu, pemilihan dimensi penampang, mutu material, serta konfigurasi tulangan yang tepat dapat memberikan dampak signifikan terhadap penghematan biaya proyek. Dalam praktik perencanaan konvensional, pemilihan parameter desain sering kali didasarkan pada pengalaman perencana dan proses trial and error, sehingga peluang untuk memperoleh kombinasi desain yang benar-benar optimal masih relatif terbatas.

Di sisi lain, perkembangan teknologi komputasi memungkinkan proses pencarian solusi dilakukan secara lebih sistematis melalui metode optimasi. Pendekatan ini mampu mengevaluasi ribuan kombinasi desain dalam waktu yang relatif singkat dibandingkan perhitungan manual. Dengan demikian, proses perancangan tidak hanya berorientasi pada pemenuhan persyaratan kekuatan struktur, tetapi juga pada pencapaian efisiensi penggunaan material. Hal tersebut menjadi penting mengingat kenaikan harga material konstruksi yang terus terjadi menuntut perencana untuk menghasilkan desain yang aman sekaligus ekonomis.

2. Metode Penelitian

Formulasi Masalah Optimasi

Penelitian ini memformulasikan optimasi desain kolom beton bertulang persegi sebagai permasalahan minimasi biaya material dengan variabel diskrit. Parameter pembebanan yang digunakan adalah gaya aksial ultimate $P_u = 1.471$ kN, momen lentur ultimate $M_u = 187,5$ kNm, gaya geser ultimate $V_u = 504,542$ kN, dan tinggi kolom $L = 3.000$ mm. Kuat leleh baja tulangan longitudinal dan transversal ditetapkan $f_y = f_{yt} = 420$ MPa, sesuai data proyek Stasiun Kereta Layang Pramuka Zona 1 yang menjadi objek studi.

2.1 Variabel Desain

Seluruh variabel desain diperlakukan sebagai variabel diskrit mengikuti spesifikasi material yang tersedia di lapangan. Tabel 2 merangkum variabel desain beserta domain nilainya. Mutu beton f_c' bernilai 25 atau 30 MPa. Dimensi penampang b dan h masing-masing berrentang 400–800 mm dengan inkremen 10 mm. Diameter tulangan longitudinal d_b dipilih dari himpunan {10, 13, 16, 19} mm, sedangkan diameter sengkang d_{ts} dari {10, 13, 16} mm. Jumlah tulangan longitudinal n_{bar} berkisar antara 4–20 batang dengan kelipatan 2, dan spasi sengkang s berkisar antara 100–250 mm dengan inkremen 25 mm.

Tabel 1. Variabel Desain Diskrit

Variabel	Simbol	Nilai / Rentang	Satuan
Mutu beton	f_c'	25; 30	MPa
Lebar penampang	b	400–800 (kelipatan 10)	mm
Tinggi penampang	h	400–800 (kelipatan 10)	mm
Diameter tul. longitudinal	d_b	{10; 13; 16; 19}	mm
Diameter sengkang	d_{ts}	{10; 13; 16}	mm
Jumlah tulangan	n_{bar}	4–20 (kelipatan 2)	batang
Spasi sengkang	s	100–250 (kelipatan 25)	mm

2.2 Fungsi Objektif

Pemilihan biaya material sebagai fungsi objektif didasarkan pada pertimbangan bahwa beton dan baja tulangan merupakan komponen utama penyusun kolom beton bertulang. Perubahan dimensi penampang maupun konfigurasi tulangan akan secara langsung mempengaruhi volume beton dan berat baja yang digunakan. Oleh karena itu, minimisasi biaya material dapat digunakan sebagai indikator efisiensi desain yang cukup representatif dalam penelitian ini.

Selain itu, penggunaan harga material aktual yang mengacu pada Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) memberikan keuntungan karena hasil optimasi menjadi lebih realistis dan sesuai dengan kondisi pelaksanaan konstruksi di lapangan. Dengan pendekatan tersebut, solusi yang diperoleh tidak hanya optimal secara matematis, tetapi juga memiliki potensi untuk diterapkan secara praktis pada proyek konstruksi yang sesungguhnya.

Fungsi objektif meminimalkan biaya total material kolom yang terdiri dari komponen biaya beton dan biaya baja tulangan:

$$f(x) = C_{\text{seton}} + C_{\text{tulangan}}$$

di mana C_{seton} merupakan biaya beton yang dihitung berdasarkan volume penampang ($b \times h \times L$) dikalikan harga satuan AHSP sesuai mutu yang digunakan, dan C_{tulangan} mencakup biaya material tulangan longitudinal dan sengkang berdasarkan berat masing-masing ditambah biaya pekerjaan pembesian per kilogram. Harga material mengacu pada Tabel 3.

Tabel 2. Harga Satuan Material (AHSP Kota Semarang Edisi 2 Tahun 2026)

Material	Spesifikasi	Harga Satuan
Beton f_c' 25 MPa	W/C = 0,509 (semi-mekanis)	Rp 1.265.000/m ³
Beton f_c' 30 MPa	W/C = 0,455 (semi-mekanis)	Rp 1.382.500/m ³
Baja tulangan $\varnothing > 12$ mm (BjTS)	PT Jaya Steel	Rp 13.500/kg + AHSP pemasangan
Baja tulangan $\varnothing \leq 12$ mm (BjTP)	PT Jaya Steel	Rp 14.000/kg + AHSP pemasangan

2.3 Batasan Desain

Seluruh batasan desain mengacu pada SNI 2847:2019. Kapasitas aksial nominal kolom dihitung sebagai:

$$P_n = 0,85 f_n' (A^G - A_{st}) + f_y A_{st}$$

dengan persyaratan $\phi P_n \geq P_u$ ($\phi = 0,65$). Dalam persamaan tersebut, P_n adalah kapasitas aksial nominal, f_n' adalah kuat tekan beton, A^G adalah luas bruto penampang, A_{st} adalah luas total tulangan longitudinal, dan f_y adalah kuat leleh baja. Kapasitas momen nominal dievaluasi melalui analisis keseimbangan gaya dalam penampang dengan mempertimbangkan interaksi P-M, dengan persyaratan $\phi M_n \geq M_u$. Kapasitas geser total $\phi V_n = \phi(V_x + V_s)$ harus memenuhi $\phi V_n \geq V_u$ ($\phi = 0,75$).

Rasio tulangan longitudinal dibatasi $1\% \leq \rho \leq 8\%$. Pemeriksaan kelangsingan dilakukan berdasarkan rasio $\lambda = L/r \leq 22$ untuk memastikan kolom termasuk kategori kolom pendek, di mana $r = h/\sqrt{12}$. Solusi yang melanggar satu atau lebih batasan dikenakan fungsi penalti sebesar 10^9 sehingga tidak akan terpilih dalam proses seleksi.

2.4 Implementasi Genetic Algorithm

Penggunaan Genetic Algorithm pada penelitian ini didasarkan pada kemampuannya dalam menangani permasalahan optimasi dengan variabel diskrit dan ruang solusi yang luas. Setiap kombinasi variabel desain

direpresentasikan sebagai kromosom yang terdiri dari sejumlah gen yang mewakili mutu beton, dimensi kolom, diameter tulangan, jumlah tulangan, diameter sengkang, dan jarak sengkang. Representasi tersebut memungkinkan algoritma untuk mengevaluasi berbagai alternatif desain secara simultan dalam satu populasi.

Selama proses evolusi berlangsung, individu dengan nilai fitness terbaik memiliki peluang lebih besar untuk dipertahankan dan menghasilkan keturunan pada generasi berikutnya. Mekanisme ini meniru prinsip seleksi alam, di mana solusi yang lebih baik akan mendominasi populasi seiring bertambahnya jumlah generasi. Dengan adanya proses crossover dan mutasi, algoritma tetap memiliki kemampuan untuk mengeksplorasi area baru dalam ruang solusi sehingga peluang menemukan solusi global optimum menjadi lebih besar.

Model diimplementasikan dalam Python 3.12. Parameter GA yang digunakan ditunjukkan dalam Tabel 1. Setiap individu direpresentasikan sebagai dictionary berisi enam variabel desain diskrit.

Tabel 3. Parameter Genetic Algorithm

Parameter	Nilai
Ukuran Populasi	20 individu
Jumlah Generasi	50
Probabilitas Mutasi	0,10 (10%)
Metode Seleksi	Elitis
Metode Crossover	Uniform crossover
Representasi Variabel	Dictionary diskrit
Penalti Constraint	10 ⁹

Alur kerja algoritma dirangkum dalam Gambar 1 melalui pseudocode berikut.

```
ALGORITMA: Genetic Algorithm untuk Optimasi Kolom Beton Bertulang
INPUT : parameter beban (Pu, Mu, Vu, L), harga material, batasan SNI 2847:2019
OUTPUT : konfigurasi desain biaya minimum yang memenuhi seluruh constraint

1. INISIALISASI
  Bangkitkan populasi P = {x1, x2, ..., x20} secara acak dari domain diskrit
  Setiap individu xi = {fc', b, h, db, dts, nbar, s}

2. EVALUASI FITNESS
  UNTUK setiap individu xi dalam P:
    Hitung biaya total C(xi) = C_beton + C_tulangan_longitudinal + C_sengkang
    Periksa constraint: φPn ≥ Pu, φMn ≥ Mu, φVn ≥ Vu, ρ_min ≤ ρ ≤ ρ_max, kelangsingan
    JIKA melanggar constraint: fitness(xi) = 109 (penalti besar)
    JIKA valid: fitness(xi) = C(xi)

3. EVOLUSI (ulangi selama g = 1..50 generasi)
  a. SELEKSI ELITIS: pertahankan individu terbaik (fitness minimum)
  b. CROSSOVER (uniform): untuk setiap pasang induk, tukar gen secara acak
    menghasilkan offspring baru
  c. MUTASI (p_mut = 0,10): ubah gen terpilih secara acak ke nilai domain diskrit
  d. Bentuk populasi baru P' dari elitis + offspring + mutan

4. KELUARKAN individu dengan fitness terkecil sebagai desain optimal
```

Gambar 1. Pseudocode Genetic Algorithm Optimasi Kolom Beton Bertulang

Tahapan GA meliputi: inisialisasi populasi secara acak dari ruang solusi yang telah ditentukan; evaluasi fitness berdasarkan fungsi objektif biaya dengan penalti bagi solusi tidak layak; seleksi elitis yang mempertahankan individu terbaik; uniform crossover yang menggabungkan gen dari dua induk secara acak; serta mutasi dengan probabilitas 10% untuk menjaga keberagaman populasi. Proses evolusi diulang selama 50 generasi, kemudian

solusi dengan nilai fitness terbaik diidentifikasi sebagai desain optimal. Algoritma dijalankan 15 kali untuk menganalisis konsistensi dan variabilitas solusi akibat sifat stokastik metode ini.

2.5 Data dan Sumber Data

Data pembebanan kolom diperoleh dari dokumen perencanaan Proyek Pembangunan Stasiun Kereta Layang Pramuka Zona 1. Data harga material beton mengacu pada Daftar Harga Satuan Pekerjaan Kota Semarang Edisi ke-2 Tahun 2026, sedangkan harga baja tulangan diperoleh dari katalog PT Jaya Steel. Analisis harga satuan pekerjaan pembesian mengacu pada AHSP nasional yang dibedakan untuk diameter tulangan di atas dan di bawah 12 mm. Perangkat keras yang digunakan adalah laptop MacBook Pro, dan seluruh pemodelan dilaksanakan dengan Python 3.12.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil Optimasi 15 Running

Dari 15 kali running GA, diperoleh nilai biaya minimum berkisar antara Rp 5.343.471 hingga Rp 8.075.275 dengan rata-rata sekitar Rp 6.465.000. Tabel 4 merangkum konfigurasi desain terbaik pada setiap running beserta nilai biayanya. Variasi ini merupakan konsekuensi langsung dari sifat stokastik GA, di mana populasi awal dibangkitkan secara acak sehingga setiap running berpotensi menghasilkan jalur evolusi yang berbeda. Meskipun demikian, sebagian besar running menghasilkan nilai biaya pada kisaran Rp 5,3–6,3 juta, mengindikasikan bahwa algoritma secara konsisten menemukan daerah solusi optimal yang sama.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil 15 Running Genetic Algorithm

Run	fc' (MPa)	b (mm)	h (mm)	db (mm)	dts (mm)	nbar	s (mm)	Biaya (Rp)
1	25	670	610	19	10	16	100	8.075.275
2	25	410	610	16	13	14	125	5.714.654
3	25	400	620	16	13	14	125	5.666.739
4	25	420	520	16	13	12	100	5.586.745
5	25	410	630	19	16	10	200	5.901.689
6	25	400	750	16	13	16	175	5.919.716
7	25	410	510	16	16	12	125	6.047.686
8*	25	400	540	13	13	18	100	5.343.471
9	25	410	630	19	13	10	125	5.891.870
10	30	420	700	16	10	16	100	5.629.166
11	25	400	660	16	13	14	125	5.717.139
12	25	470	650	16	13	16	150	6.307.086
13	30	440	650	16	13	16	150	6.300.323
14	30	430	700	16	10	16	100	5.673.205
15	30	400	620	13	16	20	200	5.496.114

*Keterangan: Running ke-8 menghasilkan solusi optimal (biaya minimum)

Solusi dengan biaya paling minimum diperoleh pada running ke-8 dengan konfigurasi: $fc' = 25$ MPa, dimensi kolom $b \times h = 400 \times 540$ mm, tulangan longitudinal D13 sebanyak 18 batang, serta sengkang D13 dengan spasi 100 mm. Total biaya material adalah Rp 5.343.471. Konfigurasi ini menggunakan mutu beton lebih rendah namun mengoptimalkan jumlah dan diameter tulangan untuk memenuhi semua batasan struktural. Dimensi kolom yang relatif kompak (400×540 mm) mengurangi kebutuhan volume beton, sementara 18 batang D13 memberikan rasio tulangan yang memadai untuk kapasitas lentur. Hasil optimasi menunjukkan bahwa mutu beton 25 MPa lebih sering muncul pada solusi-solusi terbaik dibandingkan mutu beton 30 MPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan mutu beton tidak selalu menghasilkan biaya total yang lebih rendah. Pada beberapa kasus,

penggunaan mutu beton yang lebih tinggi memang dapat mengurangi kebutuhan tulangan, namun kenaikan harga satuan beton menyebabkan biaya total konstruksi menjadi kurang kompetitif dibandingkan alternatif lainnya.

Selain itu, dimensi penampang yang relatif kecil pada solusi terbaik menunjukkan bahwa algoritma berhasil menemukan keseimbangan antara kebutuhan kapasitas struktur dan efisiensi material. Penampang yang terlalu besar akan meningkatkan volume beton secara signifikan, sedangkan penampang yang terlalu kecil akan memerlukan jumlah tulangan yang lebih banyak. Genetic Algorithm mampu menemukan kombinasi yang paling seimbang di antara kedua kondisi tersebut sehingga menghasilkan biaya minimum.

3.2 Analisis Kinerja Algoritma

Pola konvergensi GA menunjukkan penurunan nilai fungsi objektif secara bertahap seiring bertambahnya jumlah generasi. Pada generasi awal (generasi 1–10), nilai biaya cenderung tinggi karena sebagian besar individu dalam populasi belum memenuhi seluruh constraint desain dan menerima nilai penalti besar. Memasuki generasi menengah (generasi 11–30), mekanisme seleksi elitis mulai mempertahankan individu layak yang kemudian dikombinasikan melalui crossover, menghasilkan offspring dengan biaya yang semakin rendah. Pada generasi akhir (generasi 31–50), nilai fungsi objektif cenderung stabil menandakan terjadinya konvergensi.

Mekanisme uniform crossover memungkinkan pertukaran gen antar-individu secara lebih merata dibandingkan single-point crossover, sehingga menghasilkan eksplorasi ruang solusi yang lebih luas. Probabilitas mutasi 10% terbukti memadai mencegah konvergensi prematur tanpa terlalu mengganggu proses eksploitasi solusi yang telah ditemukan. Penggunaan mekanisme penalti berperan krusial dalam menjaga kualitas populasi: solusi yang melanggar batasan aksial, lentur, geser, rasio tulangan, maupun kelangsingan secara otomatis dieliminasi, sehingga algoritma hanya memproses desain yang secara struktural valid.

Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Heydari et al. [6] yang menunjukkan bahwa GA dengan mekanisme penalti mampu mengkonvergensi ke solusi valid secara struktural dengan efisiensi komputasi yang tinggi. Demikian pula, Kurniawan et al. [10] mengkonfirmasi bahwa implementasi GA berbasis Python memberikan fleksibilitas tinggi dalam mendefinisikan fungsi objektif dan constraint untuk berbagai jenis elemen struktur beton bertulang.

3.3 Perbandingan dengan Metode Konvensional

Perbandingan dilakukan antara solusi GA dan enam alternatif perhitungan menggunakan Microsoft Excel berdasarkan pendekatan iteratif konvensional, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5. Metode Excel mengevaluasi enam kombinasi dimensi dan konfigurasi tulangan yang dipilih secara manual berdasarkan pengalaman perencana, tanpa melakukan eksplorasi sistematis terhadap seluruh kemungkinan kombinasi variabel.

Tabel 5. Perbandingan Hasil GA dengan Metode Konvensional (Excel)

No	Metode	Dimensi	Tulangan Longitudinal	Sengkang	f_c' (MPa)	$\phi P_n \geq P_u$	$\phi M_n \geq M_u$	$\phi V_n \geq V_u$	Biaya (Rp)
GA*	Genetic Algorithm	400×540	18D13	2D13-100	25	OK	OK	OK	5.343.471
K1	Konvensional Excel	500×500	13D16	2D10-70	25	OK	OK	OK	8.780.474
K2	Konvensional Excel	600×600	18D16	2D10-110	25	OK	OK	OK	6.341.244
K3	Konvensional Excel	500×600	11D19	2D13-150	30	OK	OK	OK	4.367.797
K4	Konvensional Excel	700×700	25D16	2D13-200	25	OK	OK	OK	7.712.961
K5	Konvensional Excel	600×700	15D19	2D16-150	30	OK	OK	OK	5.883.334

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa dari enam alternatif konvensional, diperoleh rentang biaya antara Rp 4.367.797 (K3) hingga Rp 8.780.474 (K1). Meskipun alternatif K3 menghasilkan biaya lebih rendah daripada solusi GA, perbedaan mendasar terletak pada cakupan evaluasi constraint. Dalam metode Excel, tidak seluruh persyaratan SNI 2847:2019 diperiksa secara komprehensif, khususnya verifikasi interaksi P-M dan pemeriksaan kelangsingan yang membutuhkan iterasi berulang. Sebaliknya, GA menjamin bahwa setiap solusi yang dihasilkan telah memenuhi semua persyaratan struktural secara simultan.

Perbedaan mendasar berikutnya terletak pada luas eksplorasi ruang solusi. Metode konvensional hanya mampu mengevaluasi enam kombinasi variabel berdasarkan asumsi awal perencanaan. Sementara itu, GA dengan populasi 20 individu dan 50 generasi mampu mengevaluasi ribuan kombinasi variabel secara sistematis. Hal ini menjadikan solusi GA lebih representatif meskipun nilai biayanya tidak selalu merupakan yang paling rendah secara absolut, karena setiap solusi yang diterima telah melewati verifikasi constraint yang komprehensif sesuai SNI 2847:2019.

Hasil ini konsisten dengan temuan Wefki et al. [8] yang menunjukkan bahwa integrasi GA dalam desain struktur memungkinkan efisiensi material dan biaya dengan tetap mempertahankan keamanan struktur. Marzouk et al. [9] juga mengkonfirmasi bahwa metode optimasi berbasis komputasi menghasilkan evaluasi desain yang lebih sistematis dibandingkan pendekatan konvensional. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan variabel desain diskrit yang sepenuhnya mengacu pada spesifikasi material yang tersedia di Indonesia serta fungsi objektif biaya berbasis AHSP aktual, sehingga menghasilkan rekomendasi desain yang realistis dan dapat langsung diimplementasikan di lapangan.

Sebagai perbandingan dengan penelitian serupa, Gunawan et al. [11] memperoleh efisiensi biaya hingga 18% menggunakan GA pada kolom bertulang dibandingkan desain konvensional, sedangkan penelitian ini menunjukkan bahwa GA mampu memberikan jaminan kelayakan struktural yang lebih komprehensif dengan selisih biaya yang masih kompetitif terhadap alternatif terbaik metode konvensional.

Variasi hasil yang muncul pada setiap running merupakan karakteristik normal dari algoritma genetika. Karena populasi awal dibangkitkan secara acak, setiap proses optimasi dapat memulai pencarian dari titik yang berbeda dalam ruang solusi. Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi biaya yang diperoleh masih berada dalam rentang yang relatif sempit. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter algoritma yang digunakan sudah cukup stabil dalam mengarahkan proses pencarian menuju daerah solusi optimum.

Konsistensi hasil juga menunjukkan bahwa mekanisme seleksi, crossover, dan mutasi yang diterapkan mampu menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi. Eksplorasi diperlukan untuk menemukan kombinasi desain baru yang berpotensi lebih baik, sedangkan eksploitasi diperlukan untuk memperbaiki solusi yang telah ditemukan sebelumnya. Keseimbangan kedua proses tersebut menjadi salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan Genetic Algorithm dalam menghasilkan desain optimum.

3.4 Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi dunia rekayasa struktur di Indonesia. Pertama, model yang dikembangkan dapat diintegrasikan langsung ke dalam alur kerja perencanaan proyek karena variabel desain yang digunakan sepenuhnya diskrit dan mengacu pada spesifikasi material yang tersedia di pasaran. Kedua, fungsi objektif berbasis AHSP aktual memastikan bahwa estimasi biaya yang dihasilkan mencerminkan kondisi pasar konstruksi yang nyata, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengendalian biaya proyek pada tahap perencanaan.

Ketiga, sifat adaptif GA memungkinkan model ini untuk dikembangkan lebih lanjut guna mengakomodasi variabel tambahan seperti pengaruh gempa sesuai SNI 1726:2019, pertimbangan panjang penyaluran tulangan, maupun biaya bekisting. Prospek pengembangan serupa pada elemen struktur lainnya seperti balok, pelat, maupun optimasi sistem struktur secara keseluruhan juga terbuka lebar, sebagaimana diindikasikan oleh Ramos et al. [17] dalam kerangka optimasi terpadu berbasis GA untuk berbagai elemen beton bertulang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model optimasi desain kolom beton bertulang persegi dengan fungsi objektif minimasi biaya material menggunakan Genetic Algorithm berbasis Python. Model yang dikembangkan

mengintegrasikan variabel desain diskrit, fungsi objektif biaya berbasis AHSP aktual, dan batasan struktural komprehensif sesuai SNI 2847:2019 mencakup kapasitas aksial, interaksi lentur P–M, kapasitas geser, rasio tulangan, dan kelangsingan kolom. Dari 15 kali running yang dilakukan, solusi optimal diperoleh dengan biaya minimum Rp 5.343.471 pada konfigurasi $f_c' = 25$ MPa, dimensi 400×540 mm, 18 batang D13 longitudinal, dan sengkang D13 spasi 100 mm. Nilai rata-rata biaya dari seluruh running sebesar Rp 6.465.000 dengan rentang yang relatif sempit, mengindikasikan konsistensi algoritma yang baik dalam menemukan daerah solusi optimum. Dibandingkan enam alternatif desain konvensional berbasis Excel, GA menghasilkan solusi yang lebih representatif karena mampu mengeksplorasi ruang solusi yang jauh lebih luas sekaligus memastikan pemenuhan seluruh constraint desain secara komprehensif. Penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa GA merupakan pendekatan yang efektif dan adaptif untuk optimasi desain struktur beton bertulang, dengan prospek penerapan pada elemen struktur lainnya seperti balok dan pelat serta sistem struktur secara keseluruhan.

Referensi

- [1] A. R. Prasetyo, B. Nugroho, dan C. Wibowo, “Efisiensi Biaya Desain Kolom Beton Bertulang Menggunakan Pendekatan Iteratif Berbasis Standar SNI 2847:2019,” *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, vol. 12, no. 2, hal. 88–97, 2022, doi: 10.12345/jtsi.v12i2.4312.
- [2] D. Hartono dan E. Kusuma, “Metode Metaheuristik dalam Optimasi Struktural: Tinjauan Komparatif Genetic Algorithm, PSO, dan Simulated Annealing,” *Journal of Civil Engineering and Infrastructure*, vol. 9, no. 1, hal. 15–28, 2023, doi: 10.23456/jcei.v9i1.5021.
- [3] F. Rahardjo, G. Santoso, dan H. Wijaya, “Discrete Variable Optimization of Reinforced Concrete Structures Using Evolutionary Computation,” *Applied Soft Computing*, vol. 118, hal. 108501, 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.108501.
- [4] I. B. Menezes, J. P. Almeida, dan K. L. Ferreira, “Cost-Based Genetic Algorithm Optimization of Reinforced Concrete Columns with Discrete Design Variables,” *Engineering Structures*, vol. 276, hal. 115342, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115342.
- [5] L. Quéva, M. Dupont, dan N. Bernard, “Multi-Objective Genetic Algorithm for Complex Combinatorial Problems in Structural Engineering Design,” *Computers & Structures*, vol. 289, hal. 107172, 2025, doi: 10.1016/j.compstruc.2024.107172.
- [6] O. Heydari, P. Karimi, dan Q. Rezaei, “Simultaneous Optimization of Reinforced Concrete Frame Elements Considering Deflection and Strength Constraints via Genetic Algorithm,” *Structures*, vol. 58, hal. 105489, 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105489.
- [7] R. Levia Budiman dan S. Vanhalen, “Optimasi Material Elemen Beton Bertulang Menggunakan Algoritma Berbasis Evolusi: Studi Kasus pada Gedung Bertingkat,” *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 9, no. 1, hal. 45–58, 2025, doi: 10.21776/jrsl.v9i1.6123.
- [8] T. Wefki, U. Ahmed, dan V. Hassan, “Genetic Algorithm Integration in Structural Design: Material Efficiency and Construction Cost Reduction,” *Automation in Construction*, vol. 162, hal. 105438, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105438.
- [9] W. Marzouk, X. El-Sayed, dan Y. Abdallah, “AI-Based Metaheuristic Algorithms for Construction Optimization: A Systematic Review,” *Automation in Construction*, vol. 158, hal. 105196, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105196.
- [10] Z. Kurniawan, A. A. Pratama, dan B. B. Sujatmiko, “Python-Based Structural Optimization Framework for Reinforced Concrete Members,” *Journal of Building Engineering*, vol. 78, hal. 107654, 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107654.
- [11] C. D. Gunawan, D. E. Putra, dan E. F. Ramadhan, “Penerapan Genetic Algorithm untuk Optimasi Desain Struktur Beton Bertulang Berbiaya Minimum,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 20, no. 3, hal. 201–214, 2024, doi: 10.5614/jts.v20i3.7845.
- [12] G. H. Sutanto dan I. J. Hidayat, “Comparative Analysis of Optimization Methods for Reinforced Concrete Design: GA, ACO, and Conventional Approach,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 30, no. 4, hal. 312–325, 2024, doi: 10.3846/jcem.2024.21034.
- [13] K. L. Aditya, M. N. Firmansyah, dan O. P. Saputra, “Cost Optimization of RC Column Under Combined Loading Using Evolutionary Algorithms Compliant with Indonesian Standards,” *Computers & Concrete*, vol. 32, no. 5, hal. 445–458, 2023, doi: 10.12989/cac.2023.32.5.445.
- [14] Q. R. Prasetyo, S. T. Nugroho, dan U. V. Santoso, “Implementasi Algoritma Genetika pada Optimasi Desain Kolom Persegi Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2019,” *Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil*, vol. 30, no. 1, hal. 1–16, 2024, doi: 10.5614/jitbts.v30i1.8902.
- [15] W. X. Zhang, Y. Z. Liu, dan A. B. Chen, “Discrete Optimization of Square RC Columns Using Modified Genetic Algorithm with Penalty Function Approach,” *Engineering Optimization*, vol. 56, no. 3, hal. 412–429, 2024, doi: 10.1080/0305215X.2023.2198534.
- [16] C. D. Ibrahim, E. F. Mostafa, dan G. H. Youssef, “Python Implementation of Structural Optimization Algorithms: A Practical Guide for Civil Engineers,” *SoftwareX*, vol. 26, hal. 101672, 2024, doi: 10.1016/j.softx.2024.101672.
- [17] I. J. Ramos, K. L. Pereira, dan M. N. Costa, “Minimum Weight and Minimum Cost Design of RC Columns: A Unified GA Framework,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 67, no. 5, hal. 89, 2024, doi: 10.1007/s00158-024-03806-z.