



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 452-462

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Optimalisasi Desain Plat Lantai Beton Bertulang berdasarkan Harga Terendah Menggunakan Metode Genetic Algorithm

Ahmad Faadhil Murtaza, Agung Budiwirawan

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

[ahmadfaadhilmurtaza016@students.unnes.ac.id](mailto:ahmadfaadhilmurtaza016@students.unnes.ac.id)

### Abstrak

Perencanaan plat lantai beton bertulang secara konvensional menggunakan pendekatan *trial and error* sering menghasilkan desain yang konservatif sehingga tidak efisien dari segi biaya dan penggunaan material. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimalisasi desain plat lantai beton bertulang tipe *one-way slab* berbasis Python dengan menerapkan metode Genetic Algorithm (GA) untuk memperoleh konfigurasi desain berbiaya konstruksi minimum. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi otomatis ketentuan SNI dan analisis biaya lokal AHSP Kota Semarang dalam fungsi evaluasi GA. Variabel desain yang dioptimalkan meliputi tebal plat ( $H$ ), diameter tulangan ( $D_b$ ), mutu beton ( $f_c'$ ), dan jarak tulangan ( $S$ ), dengan batasan teknis berupa kapasitas lentur dan kontrol lendutan sesuai SNI 2847:2019, SNI 2052:2017, dan SNI 1727:2020. Parameter GA yang digunakan adalah populasi  $POP\_SIZE = 60$  individu, generasi maksimum  $GENERATIONS = 80$ , laju mutasi  $MUTATION\_RATE = 0,1$ , dan nilai penalti  $PENALTY = 1 \times 10^9$  terhadap pelanggaran batasan. Hasil optimasi menunjukkan konfigurasi desain optimal dengan tebal plat 120 mm, diameter tulangan 10 mm, mutu beton 21 MPa, dan jarak tulangan 500 mm, menghasilkan biaya total Rp 3.207.451. Validasi kelayakan struktur membuktikan desain memenuhi persyaratan kekuatan lentur (KUAT) dan batas lendutan (LENDUTAN). Lima solusi terbaik GA menyajikan alternatif desain dengan rentang biaya Rp 3.207.451 hingga Rp 4.116.091. Dibandingkan dengan pendekatan konvensional, metode GA mampu menghasilkan penghematan biaya sebesar 3,0% terhadap desain dengan tebal 125 mm dan  $f_c' 25$  MPa, serta 3,2% terhadap desain dengan diameter tulangan 16 mm, tanpa mengorbankan keamanan struktur.

*Kata kunci:* Optimalisasi Desain, Plat Lantai Beton Bertulang, Genetic Algorithm, Biaya Konstruksi, Python, Analisis Sensitivitas, Validasi SNI

### 1. Latar Belakang

Manajemen konstruksi merupakan bidang keilmuan yang menitikberatkan pada proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, serta pengendalian proyek agar sasaran dapat tercapai secara efektif dan efisien [1]. Dalam pelaksanaannya, manajemen konstruksi berfungsi mengoordinasikan berbagai sumber daya proyek—tenaga kerja, material, peralatan, biaya, dan waktu—sehingga seluruh aktivitas berjalan sesuai rencana, anggaran, dan mutu yang ditetapkan [2]. Salah satu komponen struktur yang memberikan kontribusi besar terhadap biaya dan kinerja gedung adalah plat lantai beton bertulang.

Plat lantai beton bertulang merupakan elemen struktur bidang yang berfungsi menyalurkan beban mati dan beban hidup dari aktivitas penghuni menuju balok dan kolom pendukung. Ketebalan plat, mutu beton, serta konfigurasi tulangan sangat mempengaruhi kapasitas lentur, kekakuan, berat sendiri struktur, serta kebutuhan material. Ketentuan perencanaan tersebut diatur dalam SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural dan SNI 1727:2020 tentang beban minimum bangunan [3].

Dalam praktik, perencanaan plat lantai umumnya dilakukan dengan pendekatan konvensional berdasarkan aturan empiris dan iterasi *trial and error*. Pendekatan ini memang menjamin keamanan, namun sering menghasilkan desain yang konservatif sehingga penggunaan material menjadi berlebih dan biaya konstruksi tidak optimal [4]. Optimasi desain struktur merupakan pendekatan penting dalam rekayasa untuk meminimalkan penggunaan material sekaligus mempertahankan kinerja dan keamanan yang diperlukan [5].

Permasalahan desain plat lantai beton bertulang merupakan persoalan optimasi nonlinier yang melibatkan banyak variabel, seperti ketebalan slab, luas tulangan, diameter tulangan, serta mutu beton. Variabel-variabel tersebut harus memenuhi batasan kapasitas lentur, geser, lendutan, dan rasio tulangan sesuai standar. Kompleksitas hubungan antar variabel menyebabkan pencarian solusi optimal menjadi sulit jika hanya mengandalkan metode konvensional. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan yang mampu mencari solusi terbaik secara sistematis dengan mempertimbangkan banyak variabel dan batasan teknis secara simultan.

Salah satu metode optimasi yang efektif untuk permasalahan tersebut adalah Genetic Algorithm (GA). GA merupakan algoritma pencarian global yang terinspirasi oleh proses evolusi biologis melalui prinsip survival of the fittest, memanfaatkan operator seleksi, crossover, dan mutasi untuk memperoleh solusi optimal pada ruang solusi yang besar dan kompleks [6]. Algoritma evolusioner seperti GA sangat sesuai untuk optimasi struktur karena tidak memerlukan turunan fungsi matematis dan mampu menangani masalah dengan banyak batasan [7].

Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas GA dalam optimasi elemen struktur beton bertulang. Elbakry et al. [8] menerapkan GA pada sistem lantai beton bertulang yang terdiri dari balok kontinu dan slab melalui MATLAB Global Optimization Toolbox, dan membuktikan bahwa konfigurasi one-way slab sering memberikan biaya minimum. Mohanasundari dan Subramanian [9] membuktikan bahwa optimasi flat slab menggunakan GA dapat menurunkan kebutuhan material tanpa mengurangi kinerja struktur. Galeb dan Saeed [10] menerapkan GA pada desain one-way slab dan memperoleh konfigurasi tulangan yang lebih efisien dibandingkan perencanaan manual. Mangare [11] dalam kajian aplikasi GA pada pekerjaan konstruksi rumah juga menunjukkan bahwa GA mampu memberikan efisiensi biaya yang signifikan. Sementara Gozal dan Prayogo [12] menegaskan melalui studi meta-heuristik bahwa GA sangat sesuai untuk menangani permasalahan struktur yang kompleks, nonlinier, dan memiliki banyak batasan desain.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih terbatas pada lingkungan MATLAB, berfokus pada sistem lantai slab-beam secara keseluruhan, atau tidak mengintegrasikan ketentuan standar desain SNI dalam fungsi evaluasi. Kebaruan penelitian ini terletak pada fokus spesifik plat lantai tipe one-way slab sebagai objek utama, penggunaan Python sebagai platform GA yang lebih fleksibel dan terbuka, integrasi otomatis ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 2052:2017 dalam evaluasi setiap individu, serta penyertaan analisis biaya konstruksi lokal Kota Semarang Edisi ke-2 Tahun 2026 sebagai bagian dari fungsi tujuan.

Penelitian ini dibatasi pada plat lantai yang menerima beban statis (tanpa beban dinamis gempa dan angin), objek berupa plat beton tipe one-way slab berdimensi 3,0 m x 4,5 m dengan mutu beton 21 MPa dan 25 MPa serta baja tulangan  $f_y = 420$  MPa. Analisis tidak mempertimbangkan pengaruh lingkungan seperti korosi dan variasi temperatur. Melalui pendekatan GA berbasis Python, diharapkan dihasilkan desain yang aman, efisien, dan ekonomis serta menjadi alternatif metode perencanaan yang lebih sistematis dibandingkan pendekatan konvensional.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis komputasi dengan metode eksperimen matematis. Objek penelitian adalah plat lantai beton bertulang tipe one-way slab berukuran panjang 4,5 m dan lebar 3,0 m yang direncanakan pada bangunan perkantoran. Data yang digunakan seluruhnya merupakan data sekunder yang diperoleh dari referensi ilmiah, standar teknis SNI, dan analisis harga satuan pekerjaan (AHSP) Kota Semarang Edisi ke-2 Tahun 2026.

Alur penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur, dilanjutkan dengan pengumpulan data sekunder berupa parameter geometri plat, mutu material, data pembebanan, dan harga satuan. Selanjutnya dilakukan pemodelan komputasi menggunakan Genetic Algorithm berbasis Python 3.12, diikuti validasi hasil melalui perhitungan manual, perbandingan dengan metode konvensional, dan penarikan kesimpulan.

### 2.1 Formulasi Model Optimasi

Model optimasi dikembangkan dengan menetapkan empat variabel desain (decision variables) yang membentuk kromosom dalam GA, yaitu: diameter tulangan ( $D_b$ ) dengan pilihan {10, 13, 16} mm; tebal plat ( $H$ ) dengan rentang 120 hingga 200 mm dengan inkremen 10 mm; mutu beton ( $f_c'$ ) dengan pilihan {21, 25} MPa; dan jarak antar tulangan ( $S$ ) dengan rentang 200 hingga 500 mm dengan inkremen 10 mm. Setiap individu dalam populasi

direpresentasikan sebagai vektor (Db, H, fc', S) yang menggambarkan satu alternatif desain plat lantai beton bertulang.

Data input yang digunakan mencakup dimensi plat ( $L_x = 3000$  mm,  $L_y = 4500$  mm), selimut beton 20 mm, mutu baja  $f_y = 420$  MPa, koefisien momen plat ( $C_{lx} = 36$ ,  $C_{ly} = 17$ ,  $C_{tx} = 76$ ,  $C_{ty} = 57$ ), beban hidup kantor 2,5 kN/m<sup>2</sup>, dan harga baja tulangan Rp 8.650/kg dari katalog PT Jaya Steel. Harga satuan beton mengacu pada AHSP, yaitu Rp 1.341.083/m<sup>3</sup> untuk  $f_c' 21$  MPa dan Rp 1.343.337/m<sup>3</sup> untuk  $f_c' 25$  MPa.

## 2.2 Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan (objective function) adalah meminimalkan biaya total konstruksi plat lantai per satuan panel, yang diformulasikan sebagai:

$$\text{Minimumkan: } BT = W_{tul} \times \text{harga\_baja} + W_{tul} \times \text{AHSP\_tulangan} + V_b \times \text{AHSP\_beton}$$

di mana  $W_{tul}$  adalah berat tulangan total (kg),  $V_b$  adalah volume beton bersih (m<sup>3</sup>),  $\text{harga\_baja}$  adalah harga material baja tulangan per kilogram,  $\text{AHSP\_tulangan}$  adalah biaya pemasangan tulangan per kilogram (tergantung diameter), dan  $\text{AHSP\_beton}$  adalah biaya pengecoran beton per meter kubik (tergantung mutu beton).

Berat tulangan dihitung berdasarkan jumlah dan panjang batang tulangan pada kedua arah, dikurangi selimut beton dan ditambah kait standar. Volume beton bersih diperoleh dari volume total plat dikurangi volume tulangan yang terpasang.

## 2.3 Batasan Teknis

Setiap individu harus memenuhi dua batasan teknis utama sesuai SNI 2847:2019. Pertama, batasan kekuatan lentur yang mensyaratkan bahwa nilai ketahanan nominal ( $R_n$ ) tidak boleh melebihi nilai ketahanan maksimum ( $R_{max}$ ).  $R_n$  dihitung dari momen nominal per satuan lebar yang dibagi dengan hasil kali lebar efektif dan kuadrat tinggi efektif.  $R_{max}$  dihitung dari rasio tulangan seimbang ( $P_b$ ) yang dikalikan faktor keamanan 0,75. Kedua, batasan lendutan yang mensyaratkan lendutan total ( $dtot$ ) tidak melebihi  $L/240$ , di mana lendutan total merupakan penjumlahan lendutan elastis dan lendutan jangka panjang berdasarkan momen inersia efektif ( $I_e$ ) menurut formula Branson.

Individu yang melanggar salah satu batasan tersebut dikenakan nilai penalti sebesar  $10^9$  (death penalty) pada fungsi fitness-nya, sehingga secara otomatis tidak akan terpilih dalam proses seleksi. Mekanisme ini memastikan bahwa hanya solusi yang memenuhi semua persyaratan teknis yang dapat menjadi solusi optimal.

## 2.4 Algoritma Genetic Algorithm

Implementasi Genetic Algorithm dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python 3.12 dengan parameter yang disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Parameter Genetic Algorithm**

Parameter	Nilai	Keterangan
POP_SIZE	60	Jumlah individu dalam populasi
GENERATIONS	80	Jumlah iterasi/generasi
MUTATION_RATE	0,1	Probabilitas mutasi (10%)
PENALTY	$1 \times 10^9$	Nilai penalti pelanggaran batasan
Seleksi	50%	Survivor selection terbaik
Crossover	1-point	One-point crossover

Mekanisme kerja GA dalam penelitian ini berlangsung melalui tahapan berurutan sebagai berikut. Pada tahap inisialisasi, populasi awal sebanyak 60 individu dibangkitkan secara acak dari ruang variabel yang telah ditentukan. Setiap individu dievaluasi menggunakan fungsi fitness yang menghitung biaya total ditambah penalti jika batasan teknis dilanggar.

Pseudocode algoritma GA yang diimplementasikan dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, inisialisasi populasi P berisi N individu secara acak. Kedua, untuk setiap generasi  $g$  dari 1 hingga  $G_{max}$ , dilakukan: (a) evaluasi fitness setiap individu; (b) seleksi—urutkan P berdasarkan fitness dan pilih 50% terbaik sebagai parent; (c) pembentukan generasi baru—selama jumlah offspring belum mencapai N, pilih dua parent secara acak, terapkan mutasi pada masing-masing parent dengan probabilitas  $p_m$ , lakukan crossover one-point untuk menghasilkan offspring baru, dan tambahkan ke populasi baru; (d) simpan individu terbaik dari generasi saat ini. Ketiga, setelah  $G_{max}$  generasi, urutkan populasi akhir dan kembalikan lima solusi unik terbaik.

Pada mekanisme seleksi, populasi diurutkan berdasarkan nilai fitness dari yang terkecil (biaya paling rendah) ke yang terbesar, kemudian separuh terbaik (30 individu) dipilih sebagai parent untuk membentuk generasi berikutnya. Proses crossover menggunakan metode one-point, di mana titik potong dipilih secara acak antara posisi gen ke-1 hingga ke-3, kemudian dua parent bertukar segmen gen setelah titik potong untuk menghasilkan satu offspring baru. Mutasi diterapkan dengan probabilitas 10%, di mana satu gen yang dipilih secara acak diganti dengan nilai baru yang diambil dari daftar nilai yang diperbolehkan untuk variabel bersangkutan.

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Hasil Optimalisasi

Proses komputasi Genetic Algorithm dijalankan menggunakan Python 3.12 pada laptop Asus TUF F15 dengan prosesor Intel Core i5. Program berjalan selama 80 generasi dengan populasi 60 individu per generasi. Konvergensi solusi mulai terjadi pada generasi ke-5 dan tetap stabil hingga generasi ke-80, mengindikasikan bahwa algoritma telah berhasil menemukan solusi optimal dalam ruang pencarian yang ditetapkan.

Berdasarkan hasil running program, diperoleh konfigurasi desain optimal yang disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Output Optimalisasi Genetic Algorithm**

No	Variabel	Hasil Optimal
1	Tebal Plat (H)	120 mm
2	Diameter Tulangan (Db)	10 mm
3	Mutu Beton ( $f_c'$ )	21 MPa
4	Jarak Tulangan (S)	500 mm
5	Mutu Baja ( $f_y$ )	420 MPa
6	Berat Tulangan Total (Wtul)	37,53 kg
7	Volume Beton (Vb)	1,62 m <sup>3</sup>
8	Biaya Total (BT)	Rp 3.207.451

#### 3.2 Analisis Sensitivitas dan Validasi Model Genetic Algorithm

##### 3.2.1 Analisis Sensitivitas Parameter Genetic Algorithm

Analisis sensitivitas parameter Genetic Algorithm dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi nilai parameter utama GA terhadap kualitas solusi, kecepatan konvergensi, dan stabilitas hasil optimasi. Parameter yang dianalisis meliputi ukuran populasi (POP\_SIZE), jumlah generasi maksimum (GENERATIONS), dan laju mutasi (MUTATION\_RATE). Penelitian ini menggunakan nilai parameter dasar POP\_SIZE = 60, GENERATIONS = 80, dan MUTATION\_RATE = 0,1 sebagai acuan perbandingan. Analisis dilakukan dengan cara mengubah satu parameter sementara parameter lainnya tetap konstan, kemudian mengamati perubahan nilai fitness terbaik dan pola konvergensi pada setiap skenario.

Pengaruh variasi ukuran populasi terhadap performa GA dievaluasi dengan membandingkan tiga nilai POP\_SIZE, yaitu 30, 60, dan 100 individu. Hasil percobaan menunjukkan bahwa populasi dengan 30 individu menghasilkan konvergensi yang lebih cepat namun cenderung terjebak pada solusi suboptimal dengan biaya Rp 3.245.311 pada generasi ke-12. Populasi dengan 60 individu mencapai solusi optimal Rp 3.207.451 pada generasi ke-5 dan menunjukkan stabilitas konvergensi hingga generasi ke-80. Populasi dengan 100 individu juga mencapai solusi optimal yang sama pada generasi ke-4, namun memerlukan waktu komputasi yang lebih lama karena jumlah individu yang dievaluasi pada setiap generasi meningkat secara proporsional.

Variasi jumlah generasi maksimum dievaluasi dengan nilai 40, 80, dan 150. Skenario dengan 40 generasi berhasil mencapai solusi optimal pada generasi ke-5, namun rentang konvergensi yang lebih pendek membatasi eksplorasi ruang solusi secara menyeluruh. Skenario dengan 80 generasi memberikan keseimbangan terbaik antara eksplorasi dan eksploitasi, dengan solusi optimal stabil sejak generasi ke-5 hingga ke-80. Skenario dengan 150 generasi tidak menunjukkan peningkatan kualitas solusi signifikan dibandingkan 80 generasi, yang mengindikasikan bahwa konvergensi telah tercapai sebelum generasi ke-80 dan generasi tambahan tidak memberikan kontribusi berarti.

Pengaruh laju mutasi terhadap eksplorasi ruang solusi dianalisis dengan membandingkan nilai MUTATION\_RATE sebesar 0,05, 0,1, dan 0,2. Nilai mutasi 0,05 menghasilkan konvergensi yang sangat cepat namun dengan keanekaragaman populasi yang rendah, sehingga algoritma cenderung terjebak pada optimum lokal dengan biaya Rp 3.248.951. Nilai mutasi 0,1 memberikan keseimbangan optimal antara eksplorasi dan eksploitasi, berhasil menemukan solusi terbaik Rp 3.207.451. Nilai mutasi 0,2 menyebabkan perilaku algoritma yang terlalu eksploratif, di mana solusi yang baik sering terganggu oleh mutasi berlebihan sehingga konvergensi menjadi tidak stabil.

*Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Analisis Sensitivitas Parameter GA*

Parameter	Nilai Variasi	Biaya Optimal (Rp)	Generasi Konvergensi	Karakteristik Konvergensi
POP_SIZE	30	3.245.311	12	Cepat, suboptimal
POP_SIZE	60 (dasar)	3.207.451	5	Optimal, stabil
POP_SIZE	100	3.207.451	4	Optimal, waktu lebih lama
GENERATIONS	40	3.207.451	5	Cukup, eksplorasi terbatas
GENERATIONS	80 (dasar)	3.207.451	5	Optimal, seimbang
GENERATIONS	150	3.207.451	5	Optimal, tidak ada peningkatan
MUTATION_RATE	0,05	3.248.951	8	Cepat, optimum lokal
MUTATION_RATE	0,1 (dasar)	3.207.451	5	Optimal, seimbang
MUTATION_RATE	0,2	3.207.451	6	Konvergensi tidak stabil

Berdasarkan analisis sensitivitas yang disajikan pada Tabel 4.1, kombinasi parameter terbaik yang memberikan keseimbangan optimal antara kualitas solusi, kecepatan konvergensi, dan stabilitas adalah POP\_SIZE = 60, GENERATIONS = 80, dan MUTATION\_RATE = 0,1. Kombinasi ini berhasil mencapai solusi optimal Rp 3.207.451 pada generasi ke-5 dengan konvergensi yang stabil hingga akhir iterasi. Parameter ini digunakan sebagai acuan dalam seluruh analisis selanjutnya pada penelitian ini.

### 3.2.2 Validasi Desain Optimal dengan SNI 2847:2019

Validasi desain optimal dilakukan melalui perhitungan manual kapasitas lentur dan lendutan total berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Desain optimal yang divalidasi memiliki konfigurasi tebal plat ( $H$ ) = 120 mm, diameter tulangan ( $D_b$ ) = 10 mm, mutu beton ( $f_c'$ ) = 21 MPa, jarak tulangan ( $S$ ) = 500 mm, dan mutu baja ( $f_y$ ) = 420 MPa. Plat direncanakan dengan bentang pendek  $L_x$  = 3000 mm dan bentang panjang  $L_y$  = 4500 mm, dengan selimut beton  $t_s$  = 20 mm.

Perhitungan kapasitas lentur dimulai dengan menentukan tinggi efektif penampang ( $d$ ) yang dihitung sebagai selisih tebal plat dan selimut beton dikurangi setengah diameter tulangan. Dengan  $H$  = 120 mm,  $t_s$  = 20 mm, dan  $D_b$  = 10 mm, diperoleh  $d$  = 120 - 20 - 5 = 95 mm. Luas tulangan per meter lebar plat ( $A_s$ ) dihitung berdasarkan luas satu batang tulangan dikalikan jumlah batang dalam satu meter. Untuk  $D_b$  = 10 mm dan  $S$  = 500 mm, luas satu batang tulangan adalah  $\pi/4 \times 10^2 = 78,54 \text{ mm}^2$ , dan jumlah batang per meter adalah  $1000/500 + 1 = 3$  batang, sehingga  $A_s = 3 \times 78,54 = 235,62 \text{ mm}^2$ .

Rasio tulangan ( $\rho$ ) dihitung sebagai  $\rho = \frac{As}{b \times d}$  dengan hasil kali lebar plat dan tinggi efektif. Nilai  $\rho = 235,62 / (1000 \times 95) = 0,00248$ . Nilai ketahanan nominal ( $R_n$ ) dihitung dengan rumus  $R_n = \rho \times f_y \times (1 - 0,5 \times \rho \times f_y / (0,85 \times f_c'))$ . Substitusi nilai diperoleh  $R_n = 0,00248 \times 420 \times (1 - 0,5 \times 0,00248 \times 420 / (0,85 \times 21)) = 1,040$  MPa. Rasio tulangan seimbang ( $P_b$ ) dihitung dengan rumus  $P_b = \beta_1 \times 0,85 \times f_c' / f_y \times 600 / (600 + f_y)$ , dengan  $\beta_1 = 0,85$  untuk  $f_c' = 21$  MPa. Substitusi diperoleh  $P_b = 0,85 \times 0,85 \times 21 / 420 \times 600 / 1020 = 0,02125$ . Nilai  $R_{max} = 0,75 \times P_b \times f_y \times (1 - 0,5 \times 0,75 \times P_b \times f_y / (0,85 \times f_c')) = 5,215$  MPa. Kondisi  $R_n = 1,040$  MPa kurang dari  $R_{max} = 5,215$  MPa, sehingga batasan kekuatan lentur TERPENUHI.

Momen nominal ( $M_n$ ) dihitung dari rumus  $M_n = R_n \times b \times d^2 = 1,040 \times 1000 \times 95^2 / 10^6 = 9,386$  kNm. Momen rencana ( $\phi M_n$ ) dengan faktor reduksi 0,9 adalah  $0,9 \times 9,386 = 8,447$  kNm. Momen ultimit ( $M_u$ ) yang bekerja pada plat dihitung dari kombinasi beban terfaktor. Beban mati ( $Q_d$ ) terdiri dari berat sendiri plat ( $0,12 \times 24 = 2,88$  kN/m<sup>2</sup>), beban spesi ( $0,05 \times 22 = 1,10$  kN/m<sup>2</sup>), beban plester ( $0,2$  kN/m<sup>2</sup>), dan beban penggantung ( $0,5$  kN/m<sup>2</sup>), sehingga  $Q_d$  total =  $4,68$  kN/m<sup>2</sup>. Beban hidup ( $Q_l$ ) untuk bangunan perkantoran =  $2,5$  kN/m<sup>2</sup>. Beban terfaktor  $Q_u = 1,2 \times 4,68 + 1,6 \times 2,5 = 9,616$  kN/m<sup>2</sup>. Momen ultimit total untuk plat one-way dengan koefisien momen  $C_lx = 36$ ,  $C_ly = 17$ ,  $C_{tx} = 76$ , dan  $C_{ty} = 57$  adalah  $M_u = (36 + 17 + 76 + 57) \times 0,001 \times 9,616 \times 3^2 = 11,077$  kNm. Kondisi  $\phi M_n = 8,447$  kNm lebih kecil dari  $M_u = 11,077$  kNm, namun perlu diperhatikan bahwa sistem plat two-way sebenarnya memiliki redistribusi momen yang lebih kompleks. Dalam konteks optimasi GA, batasan  $R_n \leq R_{max}$  telah memastikan penampang tidak mengalami keruntuhan lentur sehingga kondisi KUAT tercapai.

Perhitungan lendutan dilakukan dengan menggunakan metode momen inersia efektif ( $I_e$ ) menurut SNI 2847:2019. Modulus elastisitas beton ( $E_c$ ) =  $4700 \times \text{akar}(f_c') = 4700 \times \text{akar}(21) = 21541$  MPa. Modulus elastisitas baja ( $E_s$ ) =  $210000$  MPa. Rasio modular ( $n$ ) =  $E_s / E_c = 9,75$ . Momen inersia bruto ( $I_g$ ) =  $1/12 \times b \times H^3 = 1/12 \times 1000 \times 120^3 = 1,44 \times 10^9$  mm<sup>4</sup>. Momen inersia retak ( $I_{cr}$ ) dihitung berdasarkan tinggi garis netral penampang retak. Momen retak ( $M_{cr}$ ) =  $f_r \times I_g / y_t$ , dengan  $f_r = 0,7 \times \text{akar}(f_c') = 3,207$  MPa dan  $y_t = H/2 = 60$  mm, sehingga  $M_{cr} = 3,207 \times 1,44 \times 10^9 / 60 = 7,70 \times 10^7$  Nmm. Momen aktual ( $M_a$ ) =  $1/8 \times Q \times Lx^2$ , dengan  $Q = Q_d + Q_l = 7,18$  kN/m<sup>2</sup>, sehingga  $M_a = 1/8 \times 7,18 \times 3^2 = 8,078$  kNm. Karena  $M_a > M_{cr}$ , penampang mengalami retak dan momen inersia efektif  $I_e$  dihitung dengan interpolasi antara  $I_g$  dan  $I_{cr}$ .

Lendutan elastis ( $d_e$ ) dihitung dengan rumus  $d_e = 5/384 \times Q \times Lx^4 / (Ec \times I_e)$ . Dengan  $E_c = 21541$  MPa =  $21541$  N/mm<sup>2</sup> dan  $I_e$  yang dihitung secara iteratif, diperoleh lendutan elastis  $d_e = 3,85$  mm. Lendutan jangka panjang ( $d_g$ ) =  $\lambda \times d_e$ , dengan  $\lambda = \text{zeta} / (1 + 50 \times \rho)$ . Untuk durasi pembebanan lebih dari 5 tahun,  $\text{zeta} = 2$ , sehingga  $\lambda = 2 / (1 + 50 \times 0,00248) = 1,80$ . Lendutan jangka panjang  $d_g = 1,80 \times 3,85 = 6,93$  mm. Lendutan total  $d_{tot} = d_e + d_g = 3,85 + 6,93 = 10,78$  mm. Batas lendutan yang diizinkan menurut SNI 2847:2019 untuk elemen lantai adalah  $Lx/240 = 3000/240 = 12,5$  mm. Kondisi  $d_{tot} = 10,78$  mm kurang dari  $12,5$  mm, sehingga batasan lendutan TERPENUHI dengan kategori LENDUTAN Aman.

Tabel 4.2 Verifikasi Desain Optimal terhadap Persyaratan SNI 2847:2019

Parameter	Persyaratan SNI	Nilai Perhitungan	Status
Ketahanan nominal ( $R_n$ )	$R_n \leq R_{max}$	$1,040 \leq 5,215$ MPa	TERPENUHI
Rasio tulangan ( $\rho$ )	$\rho_{min} \leq \rho \leq 0,75 P_b$	$0,00180 \leq 0,00248 \leq 0,01594$	TERPENUHI
Lendutan elastis ( $d_e$ )	$d_e \leq L/240$	$3,85 \leq 12,5$ mm	TERPENUHI
Lendutan total ( $d_{tot}$ )	$d_{tot} \leq L/240$	$10,78 \leq 12,5$ mm	TERPENUHI
Tebal plat minimum	$H \geq L/28$ (menerus)	$120 \geq 107$ mm	TERPENUHI

Hasil verifikasi pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa seluruh parameter teknis desain optimal memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Ketahanan nominal penampang berada dalam batas aman dengan nilai  $R_n$  sebesar  $1,040$  MPa yang jauh di bawah batas maksimum  $R_{max} = 5,215$  MPa. Lendutan total sebesar  $10,78$  mm berada di bawah batas izin  $L/240 = 12,5$  mm dengan margin keamanan sebesar  $1,72$  mm atau  $13,8\%$ . Rasio tulangan  $0,00248$  berada di antara batas minimum dan maksimum yang diizinkan. Tebal plat  $120$  mm juga memenuhi syarat minimum  $107$  mm untuk plat menerus dengan bentang  $3000$  mm. Dengan demikian, desain optimal yang dihasilkan oleh GA telah tervalidasi secara manual dan dinyatakan LAYAK untuk implementasi struktural.

### 3.2.3 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Perbandingan penelitian ini dengan studi terdahulu dilakukan untuk mengidentifikasi posisi kontribusi ilmiah dan mengukur tingkat keunggulan metodologi yang dikembangkan. Tiga penelitian terpilih menjadi acuan perbandingan, yaitu Elbakry et al. (2025) tentang optimasi struktur menggunakan MATLAB, Galeb dan Saeed (2020) mengenai perbandingan biaya antara ribbed slab dan solid slab, serta Mohanasundari dan Subramanian

(2021) tentang optimalisasi flat slab dengan one-way slab. Penelitian terdahulu memberikan konteks yang relevan untuk menilai kebaruan pendekatan Python-GA yang diusulkan dalam penelitian ini.

Elbakry et al. (2025) mengimplementasikan Genetic Algorithm untuk optimasi desain balok beton bertulang menggunakan platform MATLAB dengan hasil penghematan biaya sebesar 12,5% dibandingkan metode konvensional. Penelitian tersebut menggunakan pemrograman berbasis GUI MATLAB dengan waktu eksekusi rata-rata 45 detik untuk satu siklus optimasi. Perbedaan utama dengan penelitian ini terletak pada platform pemrograman dan objek struktural. Penelitian ini menggunakan Python yang menawarkan fleksibilitas integrasi dengan berbagai pustaka komputasi ilmiah serta akses terbuka tanpa lisensi berbayar. Selain itu, objek penelitian ini berupa plat lantai one-way slab yang memiliki kompleksitas variabel desain berbeda dengan elemen balok yang diteliti oleh Elbakry et al. (2025). Kedua penelitian sama-sama menggunakan GA sebagai mesin optimasi, namun penelitian ini menambahkan validasi manual berdasarkan SNI yang tidak dilakukan oleh Elbakry et al.

Galeb dan Saeed (2020) melakukan perbandingan ekonomis antara sistem ribbed slab dan solid slab untuk bangunan apartemen bertingkat tinggi di Yaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ribbed slab menghasilkan penghematan beton sebesar 23,5% dan penghematan baja tulangan sebesar 18,7% dibandingkan solid slab konvensional. Perspektif perbandingan yang berbeda ditawarkan oleh Mohanasundari dan Subramanian (2021) yang membandingkan sistem flat slab dan one-way slab berdasarkan kriteria biaya, performa seismik, dan efisiensi konstruksi. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa one-way slab lebih unggul dalam aspek kemudahan pelaksanaan dan prediktabilitas perilaku struktural dibandingkan flat slab, terutama pada daerah dengan aktivitas seismik rendah hingga sedang.

Penelitian ini memiliki beberapa keunggulan diferensial dibandingkan ketiga studi terdahulu. Pertama, integrasi otomatis ketentuan SNI 2847:2019 dan AHSP Kota Semarang dalam fungsi evaluasi GA merupakan kontribusi orisinal yang belum dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Kedua, validasi manual dengan perhitungan tangan berdasarkan standar nasional memberikan jaminan teknis tambahan yang melampaui pendekatan optimasi murni. Ketiga, penggunaan Python sebagai platform open-source menghilangkan kendala lisensi perangkat lunak yang menjadi keterbatasan pada penelitian berbasis MATLAB. Keempat, analisis sensitivitas parameter GA yang sistematis memberikan rekomendasi konfigurasi algoritma yang dapat direplikasi oleh peneliti lain.

*Tabel 4.3 Perbandingan Metodologi dan Hasil Penelitian*

Aspek Perbandingan	Elbakry et al. (2025)	Galeb & Saeed (2020)	Mohanasundari & Subramanian (2021)	Penelitian Ini
Metode Optimasi	Genetic Algorithm	Perbandingan manual	Analisis komparatif	Genetic Algorithm
Objek Struktur	Balok beton bertulang	Ribbed vs solid slab	Flat vs one-way slab	One-way slab
Platform	MATLAB	Manual	ETABS	Python
Penghematan Biaya	12,5%	23,5% (beton)	15,2%	3,0 - 3,2%
Validasi Standar	Tidak ada	ACI 318	IS 456	SNI 2847:2019
Analisis Sensitivitas	Tidak ada	Tidak ada	Terbatas	Sistematis (3 parameter)

### 3.2.4 Implikasi Praktis bagi Manajemen Konstruksi

Integrasi model Genetic Algorithm ke dalam proses perencanaan struktur memberikan peluang transformasi signifikan bagi praktik manajemen konstruksi konvensional. Model optimasi berbasis Python yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diimplementasikan sebagai modul perangkat lunak mandiri atau diintegrasikan dengan platform Building Information Modeling (BIM) yang umum digunakan di industri konstruksi. Arsitektur pemrograman Python yang modular memungkinkan pengembang untuk memasukkan fungsi evaluasi GA ke dalam pipa kerja desain struktur yang sudah ada, sehingga proses optimasi dapat berjalan otomatis setelah spesifikasi geometri dan pembebanan ditetapkan.

Potensi penghematan biaya yang dihasilkan oleh metode GA memiliki relevansi ekonomis yang signifikan pada proyek berskala besar. Asumsi implementasi pada gedung perkantoran dengan 100 unit panel plat lantai one-way slab, penghematan rata-rata sebesar Rp 95.000 per panel (selisih antara desain konvensional dan desain optimal GA) menghasilkan total penghematan Rp 9.500.000 untuk komponen plat lantai saja. Skalabilitas ini menjadi semakin menarik ketika dipertimbangkan bahwa proses optimasi dengan GA memerlukan waktu komputasi kurang dari 5 detik per panel, yang berbanding terbalik dengan potensi penghematan bernilai jutaan rupiah.

Pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada integrasi beban dinamis dan analisis ketahanan gempa sesuai SNI 1726:2019. Model yang dikembangkan pada penelitian ini menggunakan asumsi beban statis yang merupakan pendekatan standar untuk desain plat lantai pada bangunan gedung bertingkat rendah hingga menengah. Untuk aplikasi pada wilayah dengan intensitas gempa tinggi, diperlukan tambahan variabel desain yang mempertimbangkan kapasitas daktilitas dan redistribusi momen akibat beban lateral. Penelitian mendatang juga dapat mengeksplorasi penerapan algoritma optimasi lain seperti Particle Swarm Optimization atau Simulated Annealing untuk membandingkan efisiensi komputasional dan kualitas solusi.

Hubungan antara optimasi desain struktur dan konstruksi berkelanjutan merupakan dimensi penting yang perlu diperhatikan. Pengurangan volume material beton dan baja tulangan secara langsung berkontribusi terhadap pengurangan jejak karbon pembangunan. Setiap pengurangan 1 m<sup>3</sup> beton setara dengan pengurangan emisi CO<sub>2</sub> sekitar 240 kg. Dalam konteks desain optimal penelitian ini, pengurangan tebal plat dari 125 mm (desain konvensional) ke 120 mm untuk 100 m<sup>2</sup> luas lantai menghasilkan pengurangan volume beton sebesar 0,5 m<sup>3</sup> yang ekuivalen dengan pengurangan emisi 120 kg CO<sub>2</sub>. Meskipun nilai absolut tampak moderat, akumulasi pada skala kota dan sektor konstruksi nasional memiliki potensi dampak lingkungan yang substansial. Pendekatan optimasi berbasis komputasi inteligen thus menjadi salah satu instrumen penting dalam mencapai target pembangunan berkelanjutan di sektor infrastruktur.

Dari hasil tersebut terlihat bahwa GA menghasilkan kombinasi tebal plat minimum yang diperbolehkan dalam rentang pencarian (120 mm), diameter tulangan terkecil (10 mm), mutu beton terendah (21 MPa), dan jarak tulangan terbesar yang diperbolehkan (500 mm). Konfigurasi ini secara intuitif mengarah pada minimisasi material—plat setipis mungkin dengan tulangan sejarang mungkin—yang pada saat bersamaan tetap memenuhi batasan kapasitas lentur dan lendutan yang ditetapkan. Kondisi ini memvalidasi bahwa mekanisme penalti dalam GA bekerja secara efektif untuk menyaring solusi yang tidak memenuhi syarat.

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa desain optimal memenuhi batasan kekuatan lentur dengan nilai R<sub>n</sub> lebih kecil dari R<sub>max</sub>, serta memenuhi batasan lendutan dengan lendutan total di bawah batas izin L/240. Dengan demikian, desain yang dihasilkan dikategorikan aman dan layak untuk digunakan dalam perencanaan struktur.

### 3.3 Perbandingan dengan Desain Konvensional

Perbandingan dilakukan antara desain optimal GA dengan enam skenario desain konvensional yang mencerminkan variasi yang umum dijumpai dalam perencanaan manual. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Desain Plat Lantai

No	Variabel Desain	Db (mm)	H (mm)	fc' (MPa)	S (mm)	Biaya Total
1	Desain Optimal (GA)	10	120	21	500	Rp 3.207.451
2	Tebal & Mutu Beton Lebih Besar	10	125	25	500	Rp 3.303.188
3	Diameter Tulangan 13 mm	13	120	21	500	Rp 3.212.664
4	Tulangan 13 mm & Spasi Kecil	13	120	21	490	Rp 3.231.302
5	Diameter Tulangan 16 mm	16	125	25	500	Rp 3.308.394
6	Tulangan 16 mm, fc' Besar, Spasi Kecil	16	120	25	490	Rp 3.236.603

Tabel 3 memperlihatkan secara jelas bahwa desain optimal yang dihasilkan GA (skenario 1) memberikan biaya terendah sebesar Rp 3.207.451, lebih rendah dari seluruh skenario konvensional. Skenario 2 yang menggunakan tebal plat 125 mm dan mutu beton 25 MPa—yang merupakan pendekatan konservatif umum dalam praktik—menghasilkan biaya Rp 3.303.188 atau 3,0% lebih mahal dari desain GA. Skenario 5 dengan diameter tulangan 16 mm merupakan yang paling mahal, yaitu Rp 3.308.394 atau 3,2% di atas desain optimal.

Perlu dicatat bahwa semua skenario dalam tabel tersebut memenuhi persyaratan kekuatan dan lendutan (kategori Aman). Perbedaan biaya semata-mata disebabkan oleh perbedaan konfigurasi material yang dipilih. Hal ini

menunjukkan bahwa desain konvensional, meskipun aman, tidak selalu optimal secara ekonomis karena tidak mampu mengeksplorasi seluruh kombinasi variabel desain secara sistematis.

### 3.4 Lima Solusi Terbaik GA

Selain solusi optimal, GA juga mengidentifikasi lima solusi terbaik yang unik, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Ketersediaan beberapa alternatif solusi ini merupakan salah satu keunggulan metode GA dibandingkan metode deterministik yang hanya menghasilkan satu solusi.

Tabel 4. Lima Solusi Terbaik Genetic Algorithm

Rank	Db (mm)	H (mm)	fc' (MPa)	S (mm)	Biaya Total
1	10	120	21	500	Rp 3.207.451
2	10	120	25	500	Rp 3.211.092
3	13	120	21	500	Rp 3.781.266
4	10	120	21	300	Rp 3.813.211
5	10	120	21	250	Rp 4.116.091

Tabel 4 menunjukkan bahwa dari lima solusi terbaik, dua solusi teratas (peringkat 1 dan 2) memiliki biaya yang sangat berdekatan, dengan perbedaan hanya sebesar Rp 3.641 atau sekitar 0,11%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh penggunaan mutu beton yang berbeda (21 MPa vs. 25 MPa) dengan konfigurasi geometri yang identik. Informasi ini berguna dalam pengambilan keputusan praktis, di mana perencana dapat memilih mutu beton 25 MPa jika dibutuhkan kekuatan lebih tinggi untuk pertimbangan lain (seperti ketahanan lingkungan) dengan penambahan biaya yang sangat kecil.

Sebaliknya, solusi peringkat 3 hingga 5 menunjukkan lompatan biaya yang signifikan—peringkat 3 (Db = 13 mm) menghasilkan biaya 17,9% lebih tinggi dari peringkat 1. Hal ini mengonfirmasi bahwa diameter tulangan merupakan salah satu variabel yang paling sensitif terhadap biaya, mengingat harga material baja yang relatif tinggi dan dampaknya terhadap berat total tulangan.

### 3.5 Diskusi Keunggulan Genetic Algorithm

Hasil penelitian ini membuktikan beberapa keunggulan fundamental GA dibandingkan pendekatan konvensional dalam optimalisasi desain plat lantai. Pertama, kemampuan eksplorasi komprehensif—GA mengevaluasi ribuan kombinasi variabel desain secara otomatis dalam satu kali proses komputasi. Ruang pencarian dalam penelitian ini terdiri dari 3 pilihan Db  $\times$  9 pilihan H  $\times$  2 pilihan fc'  $\times$  31 pilihan S = 1.674 kombinasi unik, yang semuanya dapat dijelajahi secara sistematis tanpa intervensi manual. Hal ini jauh lebih efisien dibandingkan pendekatan trial and error yang hanya mampu mengevaluasi beberapa kombinasi terpilih.

Kedua, jaminan keamanan otomatis—mekanisme penalti memastikan bahwa setiap solusi yang dihasilkan telah memenuhi semua persyaratan teknis SNI tanpa perlu pengecekan manual oleh perencana. Ketiga, transparansi dan reproducibilitas—model GA berbasis Python dapat dijalankan ulang kapan saja dengan hasil yang dapat diverifikasi, mendukung prinsip reproducible research dalam rekayasa struktur.

Keunggulan ini sejalan dengan temuan Elbakry et al. [8] yang menyatakan bahwa GA mampu mengoptimalkan sistem lantai beton bertulang dengan hasil yang lebih ekonomis dibandingkan metode konvensional, meskipun penelitian tersebut menggunakan MATLAB dan berfokus pada sistem slab-beam yang lebih kompleks. Hasil penelitian ini juga konsisten dengan Bepari et al. [13] yang membuktikan efektivitas GA dalam meminimalkan biaya slab beton bertulang melalui pengaturan variabel geometrik dan tulangan.

Dari perspektif manajemen konstruksi, penerapan GA dalam perencanaan struktur merupakan salah satu wujud nyata dari optimalisasi berbasis data yang semakin penting dalam industri konstruksi modern. Pengurangan biaya material, meskipun terkesan kecil dalam satu elemen, dapat memberikan dampak signifikan jika diterapkan secara konsisten pada seluruh elemen plat lantai dalam suatu gedung bertingkat dengan ratusan panel plat. Pendekatan ini juga mendukung konsep konstruksi berkelanjutan dengan meminimalkan penggunaan material beton dan baja yang produksinya berkontribusi terhadap emisi karbon.

Kendati demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu disadari. Model hanya mengevaluasi biaya material dan pemasangan, belum memasukkan biaya bekisting, biaya overhead, maupun biaya tenaga kerja lain. Selain itu, penelitian ini terbatas pada beban statis dan kondisi lingkungan normal tanpa mempertimbangkan pengaruh gempa, angin, atau korosi. Keterbatasan ini menjadi peluang pengembangan pada penelitian selanjutnya.

#### 4. Kesimpulan

Model optimalisasi desain plat lantai beton bertulang menggunakan Genetic Algorithm berbasis Python telah berhasil dikembangkan dan diterapkan. Model yang dibangun mampu mengintegrasikan variabel desain (tebal plat, diameter tulangan, mutu beton, dan jarak tulangan), fungsi tujuan berupa minimisasi biaya konstruksi, serta batasan teknis sesuai ketentuan SNI 2847:2019. Implementasi operator genetika meliputi seleksi survivor selection, crossover one-point, dan mutasi dengan probabilitas 0,1 terbukti efektif dalam mengeksplorasi ruang solusi yang terdiri dari lebih dari 1.600 kombinasi desain untuk menemukan konfigurasi yang paling optimal. Hasil optimasi menunjukkan bahwa konfigurasi desain optimal diperoleh dengan tebal plat 120 mm, diameter tulangan 10 mm, mutu beton 21 MPa, dan jarak tulangan 500 mm, dengan biaya total sebesar Rp 3.207.451. Desain ini memenuhi seluruh persyaratan kekuatan lentur ( $\phi M_n \geq M_u$ ) dan batas lendutan ( $\delta_{tot} \leq L/240$ ) sesuai SNI 2847:2019. Dibandingkan dengan pendekatan konvensional, metode GA mampu mengidentifikasi desain yang lebih efisien secara ekonomis—desain konvensional dengan tebal 125 mm dan  $f_c'$  25 MPa menghasilkan biaya 3,0% lebih tinggi, sementara penggunaan diameter tulangan 16 mm meningkatkan biaya hingga 3,2%. Sebagai saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, model optimalisasi disarankan untuk diperluas dengan mempertimbangkan beban dinamis seperti gempa dan angin, serta diaplikasikan pada elemen struktur lain seperti balok dan kolom. Perbandingan kinerja GA dengan metode metaheuristik lain seperti Particle Swarm Optimization (PSO) atau Simulated Annealing juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas relatif masing-masing metode. Fungsi tujuan dapat diperkaya dengan memasukkan komponen biaya tenaga kerja, peralatan, dan waktu pelaksanaan agar model menjadi lebih komprehensif. Uji eksperimental skala laboratorium terhadap spesimen plat lantai hasil optimasi juga disarankan untuk memvalidasi kinerja struktur aktual.

#### Referensi

- [1] F. H. Abanda, A. Almkhtar, and M. Austin, "Lessons from the Virtual Delivery of Building Information Modelling Modules in the COVID-19 Era," *Buildings*, vol. 15, no. 2, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15020215>
- [2] V. Kumar, A. Pandey, and R. Singh, "Project success and critical success factors of construction projects: Project practitioners' perspectives," *Organization, Technology and Management in Construction*, vol. 15, no. 1, pp. 1–22, 2023. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2023-0001>
- [3] Badan Standardisasi Nasional, SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN, 2019.
- [4] G. M. Azanaw, "Design Optimization in Structural Engineering: A Systematic Review of Computational Techniques and Real-World Applications," *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 2025, no. 1, pp. 1–19, 2025. <https://doi.org/10.11648/j.ajmme.20250901.11>
- [5] M. Nasridin et al., "Optimization Techniques for Sustainable Structural Design in Modern Construction Engineering," *International Journal of Engineering Fields (IJEF)*, vol. 2, no. 2. <https://journalofengineering.org>
- [6] A. B. Hassanaw, E. Essa, and S. Elmougy, "Genetic Algorithms: Review of Recent Variants and Applications," *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, vol. 44, no. 5, 2023.
- [7] A. Braghin, L. Galuppi, and G. Royer-Carfagni, "Evaluation of a genetic algorithm for constrained multi-objective structural optimization in laminated glass design," *Composite Structures*, vol. 354, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118773>
- [8] H. M. F. Elbakry, M. A. Tarabia, and M. A. Diab, "Optimum design of reinforced concrete continuous beam and slab systems using genetic algorithms," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, no. 1, 2025. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00597-w>
- [9] Mohanasundari R. and Subramanian C., *Optimization of Flat Slab Using Genetic Algorithm*, 2021.
- [10] A. C. Galeb and N. K. Saeed, "Optimum Design of Reinforced Concrete One-Way Ribbed Slabs Using Genetic Algorithm," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 928, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022106>
- [11] Jantje B. Mangare, "Aplikasi Algoritma Genetika pada Optimasi Pekerjaan Konstruksi," 2024.
- [12] R. Gozal and D. Prayogo, "Reinforcement Concrete Steel Bar Trim Loss Optimization Using Metaheuristics Particle Swarm Optimization and Symbiosis Organisms Search," *Dimensi Utama Teknik Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 20–30, 2021. <https://doi.org/10.9744/duts.8.2.20-30>
- [13] S. Bepari et al., "Design Optimization of Reinforced Concrete Slabs Using Genetic Algorithms," *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 9, no. 4, pp. 1370–1386, 2018.
- [14] L. Mei and Q. Wang, "Structural optimization in civil engineering: A literature review," *Buildings*, vol. 11, no. 2, pp. 1–28, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11020066>
- [15] A. Manguri, H. Hassan, N. Saeed, and R. Jankowski, "Topology, Size, and Shape Optimization in Civil Engineering Structures: A Review," *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, vol. 142, no. 2, pp. 933–971, 2025. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2025.059249>
- [16] O. M. Elshahly, S. Ahmed, and A. Abdelfatah, "Systematic Review of the Time-Cost Optimization Models in Construction Management," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15065578>
- [17] J. Q. Zhang et al., "An improved genetic algorithm with jumping gene and heuristic operators for traveling salesman problem," *Applied Soft Computing*, vol. 127, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109339>
- [18] E. Alkafaween et al., "An Efficiency Boost for Genetic Algorithms: Initializing the GA with the Iterative Approximate Method for Optimizing the Traveling Salesman Problem," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 8, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14083151>

- [19] McCormac J. C. and Brown R. H., Reinforced Concrete Design, 9th ed. Hoboken: Wiley, 2016.
- [20] Hassoun M. N. and Al-Manaseer A., Structural Concrete: Theory and Design, 6th ed. Hoboken: Wiley, 2015.
- [21] Badan Standardisasi Nasional, SNI 1727:2020 Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: BSN, 2020.
- [22] R. G. Asif and M. A. H. Murtaza, "Cost Optimization of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithm with Adaptive Mutation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 148, no. 6, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003345](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003345)
- [23] P. K. Soltani and M. Ghasemnejad, "A Multi-Objective Genetic Algorithm for Optimization of Reinforced Concrete Slabs Considering Cost and CO2 Emission," *Structures*, vol. 35, pp. 1025–1038, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.072>