

## **Analisis Waktu Operasional Tower Crane terhadap Proyek Konstruksi Gedung Bertingkat Tinggi**

Akbar Fitra Jauhari <sup>1\*</sup>, Lila Ayu Ratna Winanda, Deviany Kartika, Vega Aditama

<sup>1</sup>Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura No. 2, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65152

\*[akbarslumerican87@gmail.com](mailto:akbarslumerican87@gmail.com)

### **ABSTRAK**

Penggunaan Tower Crane dalam proyek konstruksi gedung bertingkat tinggi sering kali mengalami masalah terkait efisiensi waktu dan biaya. Siklus kerja Tower Crane yang tidak optimal sering kali menjadi sumber keterlambatan dan pembengkakan biaya. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan Tower Crane yang berlokasi pada proyek pembangunan Gedung Kuliah Bersama (GKB) V Universitas Muhammadiyah Malang dengan fokus pada penempatan posisi, titik *dropzone*, dan radius area kerja. Dengan menerapkan pendekatan optimasi Genetika Algoritma, penelitian ini melakukan analisis kuantitatif terhadap data waktu total operasional membandingkan kondisi sebelum dan sesudah optimasi untuk mengonfirmasi efektivitas dalam manajemen proyek. Hasil analisis menunjukkan bahwa waktu siklus kerja Tower Crane berkurang sebesar 6,40%, dari total waktu kerja 1.058,48 jam menjadi 990,70 jam.

Kata kunci: Tower Crane, Genetika Algoritma, Waktu Operasional, Optimasi

### **ABSTRACT**

The use of tower cranes in high-rise building construction projects often encounters problems related to time and cost efficiency. Suboptimal Tower Crane work cycles often lead to delays and cost overruns. Therefore, this study aims to optimise the use of tower cranes at the University of Muhammadiyah Malang's Joint Lecture Building (GKB) V construction project, focusing on positioning, drop zone points, and work area radius. By applying an optimisation approach, this study conducted a quantitative analysis of total operational time data, comparing conditions before and after optimization Genetic Algorithms to confirm the effectiveness of project management. The analysis results show that the Tower Crane work cycle time was successfully reduced by 6.40%, from a total working time of 1,058.48 hours to 990.70 hours.

Keywords: Tower Crane, Genetic Algorithm, Operating hours, Optimization.



## **1. PENDAHULUAN**

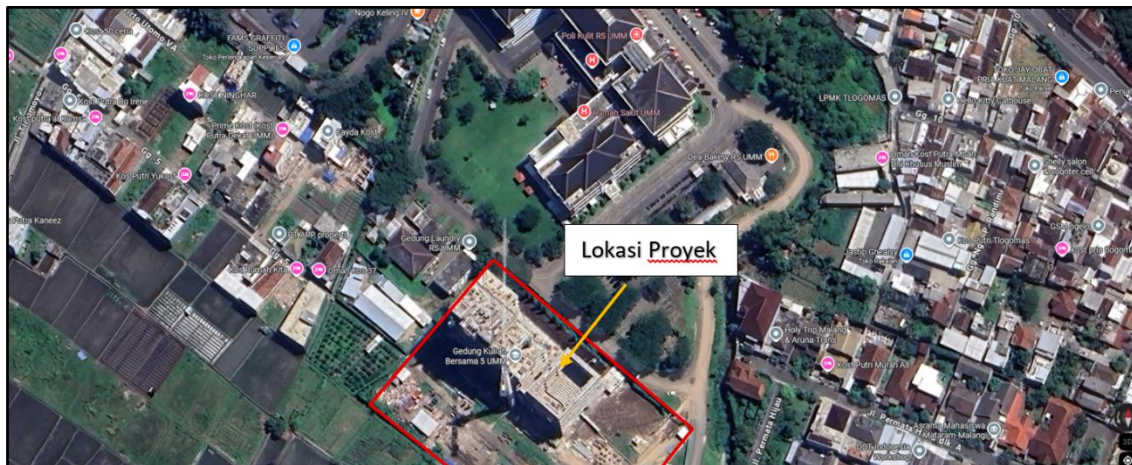
### **LATAR BELAKANG**

Proyek pembangunan gedung bertingkat, seperti Gedung GKB V di UMM, memerlukan efisiensi yang tinggi dalam setiap aspek operasionalnya. Salah satu alat vital dalam proyek ini adalah Tower Crane, yang memegang peran penting dalam mobilitas material yang diangkut. Tower crane merupakan peralatan vital dalam proyek konstruksi, berfungsi untuk memindahkan material secara vertikal dan horizontal. Siklus kerjanya meliputi empat tahapan utama: pemuatan, pengangkatan, pengangkutan, dan pelepasan beban. Namun, siklus kerja Tower Crane yang tidak optimal sering kali menyebabkan keterlambatan dan pembengkakan biaya. Efisiensi siklus ini sangat dipengaruhi oleh

faktor-faktor seperti jarak tempuh, kecepatan, dan beban yang diangkat. Penelitian oleh (Anggreini, 2023) yang menganalisis produktivitas dan biaya operasional Tower Crane eksisting. (Muliawan & Nursin, 2022) menekankan pentingnya mempertimbangkan berbagai faktor dalam penempatan Tower Crane untuk mengoptimalkan waktu siklus. Beberapa penelitian sebelumnya juga telah mengaplikasikan Genetika Algoritma dalam dunia konstruksi seperti penelitian oleh (Wu et al., 2020) yang menggunakan pendekatan serupa untuk perencanaan spasial Tower Crane. (Tiyas & Prasetyono, 2024) serta (Utari & Afrida, 2023) juga melakukan analisis waktu siklus Tower Crane. Namun, fokus utama dari penelitian ini adalah mengukur secara spesifik dan kuantitatif dampak dari optimasi tersebut terhadap waktu dan biaya, yang membedakannya dari kajian sebelumnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan bukti yang mendukung mengenai efektivitas dalam meningkatkan efisiensi. Dengan menggunakan metode Genetika Algoritma (GA) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak MATLAB, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan waktu dan biaya operasional penggunaan tower crane pada proyek GKB V. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh solusi yang lebih efisien dan efektif.

## 2. METODE PENELITIAN

Lokasi Konstruksi pada pembangunan Gedung Kuliah bersama (GKB) V Universitas Muhammadiyah Malang ini bertempat di Jalan Raya Tlogomas No 45 Malang, Jawa Timur. Sisi utara RS Universitas Muhammadiyah, Sisi barat Sawah dan Pemukiman, Sisi Selatan RS Covid Universitas Muhammadiyah, dan Sisi Timur Pemukiman Warga.



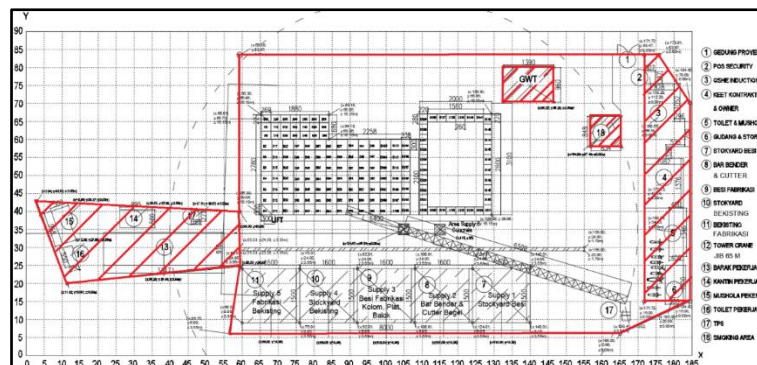
**Gambar 1** Lokasi Penelitian

Sumber: (Google Maps tahun 2025)

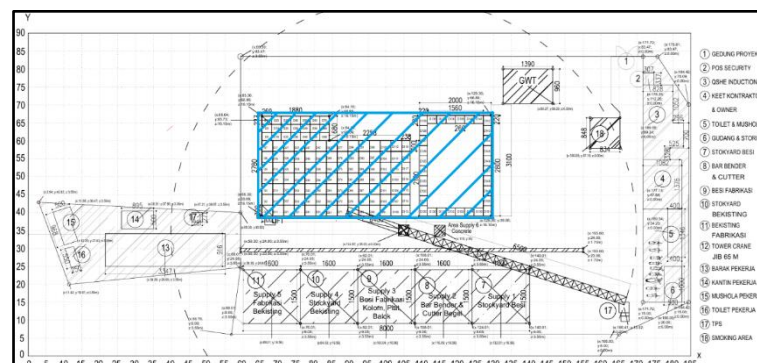
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan studi kasus pada proyek pembangunan Gedung GKB V Universitas Muhammadiyah Malang. Desain penelitian ini mengacu pada metode yang telah terbukti efektif dalam studi-studi sebelumnya. (Santosa, 2024) menunjukkan bahwa penggunaan Genetika Algoritma dapat mengurangi waktu operasional dalam proyek konstruksi, dengan melakukan optimasi terhadap posisi Tower Crane dan titik *dropzone*. Data yang digunakan berupa Data primer dan data Sekunder. Data primer meliputi data Material yang diangkat, Jam kerja alat, keterbatasan Lokasi mencakup area luar lokasi proyek konstruksi, bangunan Gedung yang akan didirikan

sebagai acuan titik permintaan (*demand*), letak fasilitas pendukung yang lokasi wilayahnya tidak bisa dilanggar pada kantor karyawan (*direksi keet*), kantin, dan barak pekerja. Sedangkan Data sekunder berupa Gambar Rencana 2D, dokumen pendukung, dan Spesifikasi Tower Crane yang digunakan. Data ini kemudian diolah menggunakan perangkat lunak pemrograman *Matrix Laboratory (MATLAB)* untuk menjalankan simulasi Genetika Algoritma. Setelah data terkumpul, model Genetika Algoritma diterapkan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dengan menerapkan metode ini, peneliti berharap dapat menghasilkan solusi optimal yang mencakup pengurangan waktu siklus yang signifikan, yang sejalan dengan hasil penelitian oleh (Hyun et al., 2021) yang menekankan pentingnya optimasi dalam penggunaan alat berat di lokasi konstruksi. Berikut ini adalah langkah-langkah penelitian yang meliputi:

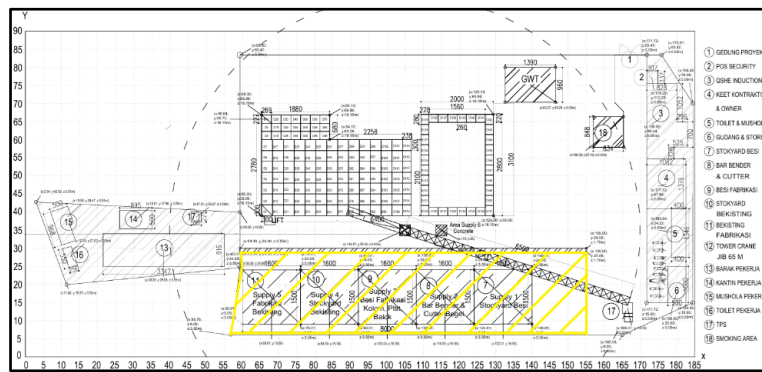
1. **Pengumpulan Data Awal:** Mengumpulkan data spesifik proyek terkait siklus kerja tower crane. Adapun area Batasan di Lokasi Gedung Kuliah Bersama V Universitas Muhammadiyah Malang diantaranya di lokasi Eksisting ini mencakup area luar lokasi proyek konstruksi, bangunan Gedung yang akan didirikan sebagai acuan titik permintaan (*demand*), letak fasilitas pendukung yang lokasi wilayahnya tidak bisa dilanggar pada kantor karyawan (*direksi keet*), kantin, dan barak pekerja seperti garis arsiran merah pada Gambar 2. Kemudian input data demand seperti garis biru pada Gambar 3. Data *supply point* ditunjukkan garis arsiran kuning pada Gambar 4.



Gambar 2 Area Batasan Proyek

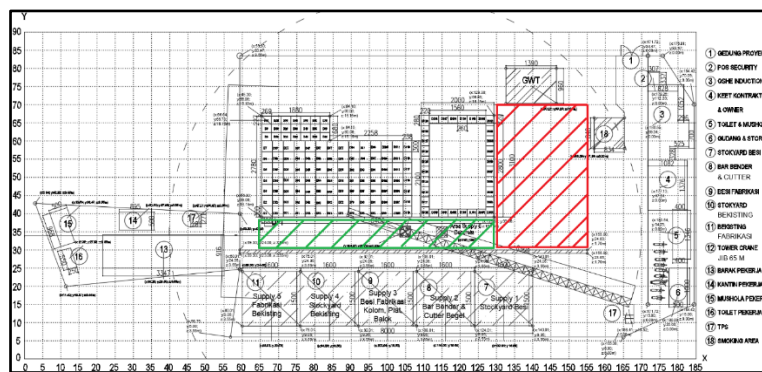


Gambar 3 Area Titik Demand



Gambar 4 Area Supply point

Adapun input Letak posisi Tower Crane yang telah ditentukan kemudian dipetakan ke dalam rencana sistem Koordinat Kartesius Local seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Denah Penempatan Lokasi Tower Crane

**ELEVASI LANTAI PADA PROYEK**

Adapun data elevasi lantai pada proyek yang dikerjakan seperti Tabel 1.

Tabel 1 Elevasi Proyek Eksisting

No	Model Penelitian	Tinggi Lantai (m)	Elevasi (m)
1.	Lantai 5	4.2	16.15
2.	Lantai 6	4.2	20.35
3.	Lantai 7	4.2	24.55
4.	Lantai 8	4.2	28.75
5.	Lantai 9	4.2	32.95
6.	Lantai 10	4.2	37.15
7.	Lantai 11	4.2	41.35
8.	Lantai 11 Atap	4.7	46.05

Adapun Spesifikasi alat berat Tower Crane yang digunakan pada penelitian ini seperti Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Tower Crane

Tower Crane 6520/10 E seri 1012 TC1700650		
Panjang Jib	Eksisting 65meter	Rencana 60meter
Kapasitas Angkut	2 ton	2.5 ton
Kecepatan Hoisting	80 m/menit	100m/menit
Kecepatan Slewing	0.6 r/menit	
Kecepatan Trolleying	55 m/menit	
Frekuensi	50Hz	
Daya Listrik - tegangan	415 V – 50 Hz	
Daya mesin	60 kW	

Sumber: (<https://cranemarket.comspecs/tower-cranes/zoomlion/tc6520-10>)

2. **Menganalisa Data:** seperti menghitung volume material yang digunakan pada proyek tersebut (besi tulangan, bekisting, dan beton segar). Setelah itu menganalisa batasan lokasi.
3. **Perancangan Model Optimasi:** Membuat perhitungan eksisting *hoisting*, *slewing*, dan *trolleying* dan model matematis dari masalah optimasi dengan Genetika Algoritma dengan meminimalkan waktu siklus operasional pada posisi, titik *dropzone*, dan radius area kerja pada Tower Crane.

### Analisis dan Model Numerik Posisi Eksisting Analisis Waktu Hoisting ( $T_v$ )

Berikut contoh analisis untuk titik permintaan pada Lantai 5  $T_{v1}$  yang dikerjakan.

Diketahui:

- Jumlah demand lantai 5 = 151 titik
- Ketinggian lantai 5 = 16.15 meter
- Kecepatan Hoisting = 80 m/menit (spesifikasi Tower Crane)
- Material per Kolom1 besi = 831.11 kg  
= 0.83 ton

Waktu Hoisting

$$T_v = \frac{Zh_5}{Vh} = \frac{\text{jarak hoisting lantai 5}}{\text{Kecepatan Hoisting Eksisting}} = \frac{16.15}{80} = 0.202 \text{ menit}$$

$$T_v = 0.202 \text{ menit} \times \text{Jumlah titik Demand untuk lantai 5}$$

$$= 0.202 \text{ menit} \times 151$$

$$= 30.48 \text{ menit}$$

1. Daya Angkut Waktu Angkat Besi Tulangan

$$\text{Waktu angkat Besi Tulangan} = \text{berat material per kolom} / \text{waktu siklus}$$

$$= 0.83 \text{ ton} / 0.202 \text{ menit}$$

$$= 4.11 \text{ ton/menit}$$

**Analisis Waktu Slewing ( $T_w$ )**

Berikut contoh analisis untuk Waktu Slewing pada Lantai 5:

**Analisa Jarak-jarak Radial**

Diketahui:

- Posisi titik demand pada sumbu x = 66.80 m
- Posisi titik demand pada sumbu y = 40.56 m
- Posisi titik supply pada sumbu x = 132.01 m
- Posisi titik supply pada sumbu y = 16.56 m
- Posisi titik Tower Crane pada sumbu x = 104.87 m
- Posisi titik Tower Crane pada sumbu y = 35.03 m

$$\begin{aligned}\rho(Di1) &= \sqrt{(XDi - XCr)^2 + (YDi - YCr)^2} \\ &= \sqrt{(Demand1 \text{ x lt. 5} - Crane \text{ x})^2 + (Demand1 \text{ y lt. 5} - Crane \text{ y})^2} \\ &= \sqrt{(66.80 \text{ m} - 104.87 \text{ m})^2 + (40.56 \text{ m} - 35.03 \text{ m})^2} \\ &= 38.47 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho(Si1) &= \sqrt{(XSi - XCr)^2 + (YSi - YCr)^2} \\ &= \sqrt{(Supply1 \text{ x lt. 5} - Crane \text{ x})^2 + (Supply1 \text{ y lt. 5} - Crane \text{ y})^2} \\ &= \sqrt{(132.01 \text{ m} - 104.87 \text{ m})^2 + (16.56 \text{ m} - 35.03 \text{ m})^2} \\ &= 32.83 \text{ m}\end{aligned}$$

**Analisa Jarak-jarak Horizontal**

Proses Kedua ialah analisa awal waktu slewing menghitung jarak-jarak horizontal dari titik supply ke titik demand (li) pada Lantai 5 di titik Supply 1.

Diketahui:

- Posisi titik centroid demand sumbu x = 66.80 m
- Posisi titik demand pada sumbu y = 40.56 m
- Posisi titik supply pada sumbu x = 132.01 m
- Posisi titik supply pada sumbu y = 16.56 m

$$\begin{aligned}li1 &= \sqrt{(XDi - XSi)^2 + (YDi - YSi)^2} \\ &= \sqrt{(D1 \text{ x lt. 5} - Supply1 \text{ x})^2 + (D1 \text{ y lt. 5} - Supply1 \text{ y})^2} \\ &= \sqrt{(66.80 - 132.01)^2 + (40.56 - 16.56)^2} \\ &= 69.49 \text{ m}\end{aligned}$$

**Besar Perpindahan Jib**

Proses Ketiga ialah analisa menghitung besar perpindahan jib ( $\theta$ ) dengan didasarkan pada data jarak yang telah dihitung sebelumnya.

Diketahui:

- Jarak Horizontal Supply 1 pada li1 = 69.49 m
- Jarak radial demand ke titik Tower Crane = 38.47 m
- Jarak radial supply ke titik Tower Crane = 32.83 m

$$\begin{aligned} \theta &= \text{arc cos} \left( \frac{li1^2 - \rho(Di1)2. \rho(Si1)^2}{2. \rho(Di1). \rho(Si1)} \right) \\ &= \text{arc cos} \left( \frac{69.49^2 - 38.47^2 - 32.83^2}{2 \times 38.47 \times 32.83} \right) \\ &= 0.45 \text{ rad} \end{aligned}$$

### Analisa Waktu Slewing ( $T_w$ )

Proses Perhitungan waktu putar (slewing) dilakukan setelah semua data penting seperti jarak radial, jarak horizontal, dan perpindahan jib yang didapatkan dari analisa awal. Salah satu contoh analisis waktu putar  $T_{w1}$  untuk supply 1 pada lantai 5 adalah sebagai berikut:

Diketahui:

- Kecepatan slewing = 0.6 r/menit
- Besar perpindahan jib = 0.45 rad

$$\begin{aligned} T_w &= \frac{1}{w} * \text{arc cos} (\theta) \\ &= \frac{1}{0.6} * 0.45 \\ &= 0.76 \text{ menit} \end{aligned}$$

### Analisa Waktu Trolleying ( $T_a$ )

Diketahui:

- Jarak radial demand ke titik Tower Crane = 38.47 m
- Jarak radial supply ke titik Tower Crane = 32.83 m
- Kecepatan Trolleying = 55 m/menit

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{|\rho(Dj) - \rho(Sj)|}{V_a} \\ &= \frac{|\text{Jarak radial Demand ke TC} - \text{Jarak radial Supply ke TC}|}{\text{Kecepatan Trolleying}} \\ &= \frac{|38.47 - 32.83|}{55} \\ &= 0.10 \text{ menit} \end{aligned}$$

### Analisa Waktu Siklus Kerja Tower Crane

Berikut Adalah analisis waktu kerja pengangkatan material

$$\begin{aligned}
 TT &= \sum_{m=1}^M (2Tv + 2Tw + 2Ta) + N \\
 &= ((2 * 811.61 + 2 * 7913.52 + 2 * 1061.58) + 4293) + \\
 &\quad (2 * 811.61 + 2 * 7913.52 + 2 * 1061.58) + 119) + \\
 &\quad (2 * 811.61 + 2 * 7913.52 + 2 * 1061.58) + 377)) \\
 &= 63.508,95 \text{ menit} \\
 &= 1.058,48 \text{ jam}
 \end{aligned}$$

4. **Simulasi dan Analisis:** Menjalankan simulasi optimasi dan menganalisis hasilnya, termasuk data waktu dan biaya yang dihasilkan oleh algoritma.

**Input Parameter Genetika Algoritma**

- Jumlah populasi = 200 (npop)
- Panjang individu (bit) = 98 (nindiv)
- Jumlah Iterasi = 1000 (niter)
- Jumlah Elit = 20 (nelits)
- Probabilitas Crossover = 0.7 (pcross)
- Laju Mutasi = 1/nindiv (nmutat)
- Jumlah titik Crossover = nindiv/2 (ncross)
- Rencana Radius Tower Crane = 60 meter (tcr)
- Material Handling Paramater = 100 m/min (kecepatan Hoisting)  
= 0.7 rad/min (kecepatan Slewing)  
= 55 m/min (kecepatan Trolleying)
- Jumlah siklus Beton = 3434 (ncs1)
- Jumlah siklus Besi Tulangan = 95 (ncs2)
- Jumlah siklus Bekisting = 302 (ncs3)

Setelah itu dilanjutkan pengkodean Tinggi bangunan lantai dan titik Tengah koordinat seperti Gambar 6.

```

% Coordinates Input
h5 = 16.15; %Satuan meter
h6 = 20.35; %Satuan meter
h7 = 24.55; %Satuan meter
h8 = 28.75; %Satuan meter
h9 = 32.95; %Satuan meter
h10 = 37.15; %Satuan meter
h11 = 41.35; %Satuan meter
h1latap = 46.05; %Satuan meter
h_all = {h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h1latap};

% Centroid Coordinates (data yang sudah ada)
dxdy_lantai_11_atap = [75.30 40.16; 78.10 40.16; 80.90 40.16; 75.40 42.56; 75.40 45.36; 75.40 48.36; 78.40 42.56; 78.40 45.36; 78.40 48.36; 81.40 42.56; 81.40 45.36; 81.40 48.36; 75.40 50.76; 75.40 53.76; 75.40 56.76; 78.40 50.76; 78.40 53.76; 78.40 56.76; 81.40 50.76; 81.40 53.76; 81.40 56.76; 75.40 59.16; 75.40 62.16; 75.40 65.16; 78.40 59.16; 78.40 62.16; 78.40 65.16; 81.40 59.16; 81.40 62.16; 81.40 65.16; 75.40 67.56; 75.40 70.56; 75.40 73.56; 78.40 67.56; 78.40 70.56; 78.40 73.56; 81.40 67.56; 81.40 70.56; 81.40 73.56; 75.40 75.96; 75.40 78.96; 75.40 81.96; 78.40 75.96; 78.40 78.96; 78.40 81.96; 81.40 75.96; 81.40 78.96; 81.40 81.96; 75.40 84.36; 75.40 87.36; 75.40 90.36; 78.40 84.36; 78.40 87.36; 78.40 90.36; 81.40 84.36; 81.40 87.36; 81.40 90.36; 75.40 92.76; 75.40 95.76; 75.40 98.76; 78.40 92.76; 78.40 95.76; 78.40 98.76; 81.40 92.76; 81.40 95.76; 81.40 98.76; 75.40 101.16; 75.40 104.16; 75.40 107.16; 78.40 101.16; 78.40 104.16; 78.40 107.16; 81.40 101.16; 81.40 104.16; 81.40 107.16; 75.40 109.56; 75.40 112.56; 75.40 115.56; 78.40 109.56; 78.40 112.56; 78.40 115.56; 81.40 109.56; 81.40 112.56; 81.40 115.56; 75.40 117.96; 75.40 120.96; 75.40 123.96; 78.40 117.96; 78.40 120.96; 78.40 123.96; 81.40 117.96; 81.40 120.96; 81.40 123.96; 75.40 126.36; 75.40 129.36; 75.40 132.36; 78.40 126.36; 78.40 129.36; 78.40 132.36; 81.40 126.36; 81.40 129.36; 81.40 132.36; 75.40 134.76; 75.40 137.76; 75.40 140.76; 78.40 134.76; 78.40 137.76; 78.40 140.76; 81.40 134.76; 81.40 137.76; 81.40 140.76; 75.40 143.16; 75.40 146.16; 75.40 149.16; 78.40 143.16; 78.40 146.16; 78.40 149.16; 81.40 143.16; 81.40 146.16; 81.40 149.16; 75.40 151.56; 75.40 154.56; 75.40 157.56; 78.40 151.56; 78.40 154.56; 78.40 157.56; 81.40 151.56; 81.40 154.56; 81.40 157.56; 75.40 159.96; 75.40 162.96; 75.40 165.96; 78.40 159.96; 78.40 162.96; 78.40 165.96; 81.40 159.96; 81.40 162.96; 81.40 165.96; 75.40 174.36; 75.40 177.36; 75.40 180.36; 78.40 174.36; 78.40 177.36; 78.40 180.36; 81.40 174.36; 81.40 177.36; 81.40 180.36; 75.40 182.76; 75.40 185.76; 75.40 188.76; 78.40 182.76; 78.40 185.76; 78.40 188.76; 81.40 182.76; 81.40 185.76; 81.40 188.76; 75.40 191.16; 75.40 194.16; 75.40 197.16; 78.40 191.16; 78.40 194.16; 78.40 197.16; 81.40 191.16; 81.40 194.16; 81.40 197.16; 75.40 199.56; 75.40 202.56; 75.40 205.56; 78.40 199.56; 78.40 202.56; 78.40 205.56; 81.40 199.56; 81.40 202.56; 81.40 205.56; 75.40 207.96; 75.40 210.96; 75.40 213.96; 78.40 207.96; 78.40 210.96; 78.40 213.96; 81.40 207.96; 81.40 210.96; 81.40 213.96; 75.40 216.36; 75.40 219.36; 75.40 222.36; 78.40 216.36; 78.40 219.36; 78.40 222.36; 81.40 216.36; 81.40 219.36; 81.40 222.36; 75.40 224.76; 75.40 227.76; 75.40 230.76; 78.40 224.76; 78.40 227.76; 78.40 230.76; 81.40 224.76; 81.40 227.76; 81.40 230.76; 75.40 233.16; 75.40 236.16; 75.40 239.16; 78.40 233.16; 78.40 236.16; 78.40 239.16; 81.40 233.16; 81.40 236.16; 81.40 239.16; 75.40 241.56; 75.40 244.56; 75.40 247.56; 78.40 241.56; 78.40 244.56; 78.40 247.56; 81.40 241.56; 81.40 244.56; 81.40 247.56; 75.40 249.96; 75.40 252.96; 75.40 255.96; 78.40 249.96; 78.40 252.96; 78.40 255.96; 81.40 249.96; 81.40 252.96; 81.40 255.96; 75.40 258.36; 75.40 261.36; 75.40 264.36; 78.40 258.36; 78.40 261.36; 78.40 264.36; 81.40 258.36; 81.40 261.36; 81.40 264.36; 75.40 266.76; 75.40 269.76; 75.40 272.76; 78.40 266.76; 78.40 269.76; 78.40 272.76; 81.40 266.76; 81.40 269.76; 81.40 272.76; 75.40 275.16; 75.40 278.16; 75.40 281.16; 78.40 275.16; 78.40 278.16; 78.40 281.16; 81.40 275.16; 81.40 278.16; 81.40 281.16; 75.40 283.56; 75.40 286.56; 75.40 289.56; 78.40 283.56; 78.40 286.56; 78.40 289.56; 81.40 283.56; 81.40 286.56; 81.40 289.56; 75.40 291.96; 75.40 294.96; 75.40 297.96; 78.40 291.96; 78.40 294.96; 78.40 297.96; 81.40 291.96; 81.40 294.96; 81.40 297.96; 75.40 300.36; 75.40 303.36; 75.40 306.36; 78.40 300.36; 78.40 303.36; 78.40 306.36; 81.40 300.36; 81.40 303.36; 81.40 306.36; 75.40 308.76; 75.40 311.76; 75.40 314.76; 78.40 308.76; 78.40 311.76; 78.40 314.76; 81.40 308.76; 81.40 311.76; 81.40 314.76; 75.40 317.16; 75.40 320.16; 75.40 323.16; 78.40 317.16; 78.40 320.16; 78.40 323.16; 81.40 317.16; 81.40 320.16; 81.40 323.16; 75.40 325.56; 75.40 328.56; 75.40 331.56; 78.40 325.56; 78.40 328.56; 78.40 331.56; 81.40 325.56; 81.40 328.56; 81.40 331.56; 75.40 333.96; 75.40 336.96; 75.40 339.96; 78.40 333.96; 78.40 336.96; 78.40 339.96; 81.40 333.96; 81.40 336.96; 81.40 339.96; 75.40 342.36; 75.40 345.36; 75.40 348.36; 78.40 342.36; 78.40 345.36; 78.40 348.36; 81.40 342.36; 81.40 345.36; 81.40 348.36; 75.40 350.76; 75.40 353.76; 75.40 356.76; 78.40 350.76; 78.40 353.76; 78.40 356.76; 81.40 350.76; 81.40 353.76; 81.40 356.76; 75.40 359.16; 75.40 362.16; 75.40 365.16; 78.40 359.16; 78.40 362.16; 78.40 365.16; 81.40 359.16; 81.40 362.16; 81.40 365.16; 75.40 367.56; 75.40 370.56; 75.40 373.56; 78.40 367.56; 78.40 370.56; 78.40 373.56; 81.40 367.56; 81.40 370.56; 81.40 373.56; 75.40 375.96; 75.40 378.96; 75.40 381.96; 78.40 375.96; 78.40 378.96; 78.40 381.96; 81.40 375.96; 81.40 378.96; 81.40 381.96; 75.40 384.36; 75.40 387.36; 75.40 390.36; 78.40 384.36; 78.40 387.36; 78.40 390.36; 81.40 384.36; 81.40 387.36; 81.40 390.36; 75.40 392.76; 75.40 395.76; 75.40 398.76; 78.40 392.76; 78.40 395.76; 78.40 398.76; 81.40 392.76; 81.40 395.76; 81.40 398.76; 75.40 401.16; 75.40 404.16; 75.40 407.16; 78.40 401.16; 78.40 404.16; 78.40 407.16; 81.40 401.16; 81.40 404.16; 81.40 407.16; 75.40 409.56; 75.40 412.56; 75.40 415.56; 78.40 409.56; 78.40 412.56; 78.40 415.56; 81.40 409.56; 81.40 412.56; 81.40 415.56; 75.40 417.96; 75.40 420.96; 75.40 423.96; 78.40 417.96; 78.40 420.96; 78.40 423.96; 81.40 417.96; 81.40 420.96; 81.40 423.96; 75.40 426.36; 75.40 429.36; 75.40 432.36; 78.40 426.36; 78.40 429.36; 78.40 432.36; 81.40 426.36; 81.40 429.36; 81.40 432.36; 75.40 434.76; 75.40 437.76; 75.40 440.76; 78.40 434.76; 78.40 437.76; 78.40 440.76; 81.40 434.76; 81.40 437.76; 81.40 440.76; 75.40 443.16; 75.40 446.16; 75.40 449.16; 78.40 443.16; 78.40 446.16; 78.40 449.16; 81.40 443.16; 81.40 446.16; 81.40 449.16; 75.40 451.56; 75.40 454.56; 75.40 457.56; 78.40 451.56; 78.40 454.56; 78.40 457.56; 81.40 451.56; 81.40 454.56; 81.40 457.56; 75.40 459.96; 75.40 462.96; 75.40 465.96; 78.40 459.96; 78.40 462.96; 78.40 465.96; 81.40 459.96; 81.40 462.96; 81.40 465.96; 75.40 468.36; 75.40 471.36; 75.40 474.36; 78.40 468.36; 78.40 471.36; 78.40 474.36; 81.40 468.36; 81.40 471.36; 81.40 474.36; 75.40 476.76; 75.40 479.76; 75.40 482.76; 78.40 476.76; 78.40 479.76; 78.40 482.76; 81.40 476.76; 81.40 479.76; 81.40 482.76; 75.40 485.16; 75.40 488.16; 75.40 491.16; 78.40 485.16; 78.40 488.16; 78.40 491.16; 81.40 485.16; 81.40 488.16; 81.40 491.16; 75.40 493.56; 75.40 496.56; 75.40 499.56; 78.40 493.56; 78.40 496.56; 78.40 499.56; 81.40 493.56; 81.40 496.56; 81.40 499.56; 75.40 501.96; 75.40 504.96; 75.40 507.96; 78.40 501.96; 78.40 504.96; 78.40 507.96; 81.40 501.96; 81.40 504.96; 81.40 507.96; 75.40 510.36; 75.40 513.36; 75.40 516.36; 78.40 510.36; 78.40 513.36; 78.40 516.36; 81.40 510.36; 81.40 513.36; 81.40 516.36; 75.40 518.76; 75.40 521.76; 75.40 524.76; 78.40 518.76; 78.40 521.76; 78.40 524.76; 81.40 518.76; 81.40 521.76; 81.40 524.76; 75.40 527.16; 75.40 530.16; 75.40 533.16; 78.40 527.16; 78.40 530.16; 78.40 533.16; 81.40 527.16; 81.40 530.16; 81.40 533.16; 75.40 535.56; 75.40 538.56; 75.40 541.56; 78.40 535.56; 78.40 538.56; 78.40 541.56; 81.40 535.56; 81.40 538.56; 81.40 541.56; 75.40 543.96; 75.40 546.96; 75.40 549.96; 78.40 543.96; 78.40 546.96; 78.40 549.96; 81.40 543.96; 81.40 546.96; 81.40 549.96; 75.40 552.36; 75.40 555.36; 75.40 558.36; 78.40 552.36; 78.40 555.36; 78.40 558.36; 81.40 552.36; 81.40 555.36; 81.40 558.36; 75.40 560.76; 75.40 563.76; 75.40 566.76; 78.40 560.76; 78.40 563.76; 78.40 566.76; 81.40 560.76; 81.40 563.76; 81.40 566.76; 75.40 569.16; 75.40 572.16; 75.40 575.16; 78.40 569.16; 78.40 572.16; 78.40 575.16; 81.40 569.16; 81.40 572.16; 81.40 575.16; 75.40 577.56; 75.40 580.56; 75.40 583.56; 78.40 577.56; 78.40 580.56; 78.40 583.56; 81.40 577.56; 81.40 580.56; 81.40 583.56; 75.40 585.96; 75.40 588.96; 75.40 591.96; 78.40 585.96; 78.40 588.96; 78.40 591.96; 81.40 585.96; 81.40 588.96; 81.40 591.96; 75.40 594.36; 75.40 597.36; 75.40 600.36; 78.40 594.36; 78.40 597.36; 78.40 600.36; 81.40 594.36; 81.40 597.36; 81.40 600.36; 75.40 602.76; 75.40 605.76; 75.40 608.76; 78.40 602.76; 78.40 605.76; 78.40 608.76; 81.40 602.76; 81.40 605.76; 81.40 608.76; 75.40 611.16; 75.40 614.16; 75.40 617.16; 78.40 611.16; 78.40 614.16; 78.40 617.16; 81.40 611.16; 81.40 614.16; 81.40 617.16; 75.40 619.56; 75.40 622.56; 75.40 625.56; 78.40 619.56; 78.40 622.56; 78.40 625.56; 81.40 619.56; 81.40 622.56; 81.40 625.56; 75.40 627.96; 75.40 630.96; 75.40 633.96; 78.40 627.96; 78.40 630.96; 78.40 633.96; 81.40 627.96; 81.40 630.96; 81.40 633.96; 75.40 636.36; 75.40 639.36; 75.40 642.36; 78.40 636.36; 78.40 639.36; 78.40 642.36; 81.40 636.36; 81.40 639.36; 81.40 642.36; 75.40 644.76; 75.40 647.76; 75.40 650.76; 78.40 644.76; 78.40 647.76; 78.40 650.76; 81.40 644.76; 81.40 647.76; 81.40 650.76; 75.40 653.16; 75.40 656.16; 75.40 659.16; 78.40 653.16; 78.40 656.16; 78.40 659.16; 81.40 653.16; 81.40 656.16; 81.40 659.16; 75.40 661.56; 75.40 664.56; 75.40 667.56; 78.40 661.56; 78.40 664.56; 78.40 667.56; 81.40 661.56; 81.40 664.56; 81.40 667.56; 75.40 669.96; 75.40 672.96; 75.40 675.96; 78.40 669.96; 78.40 672.96; 78.40 675.96; 81.40 669.96; 81.40 672.96; 81.40 675.96; 75.40 678.36; 75.40 681.36; 75.40 684.36; 78.40 678.36; 78.40 681.36; 78.40 684.36; 81.40 678.36; 81.40 681.36; 81.40 684.36; 75.40 686.76; 75.40 689.76; 75.40 692.76; 78.40 686.76; 78.40 689.76; 78.40 692.76; 81.40 686.76; 81.40 689.76; 81.40 692.76; 75.40 695.16; 75.40 698.16; 75.40 701.16; 78.40 695.16; 78.40 698.16; 78.40 701.16; 81.40 695.16; 81.40 698.16; 81.40 701.16; 75.40 703.56; 75.40 706.56; 75.40 709.56; 78.40 703.56; 78.40 706.56; 78.40 709.56; 81.40 703.56; 81.40 706.56; 81.40 709.56; 75.40 711.96; 75.40 714.96; 75.40 717.96; 78.40 711.96; 78.40 714.96; 78.40 717.96; 81.40 711.96; 81.40 714.96; 81.40 717.96; 75.40 720.36; 75.40 723.36; 75.40 726.36; 78.40 720.36; 78.40 723.36; 78.40 726.36; 81.40 720.36; 81.40 723.36; 81.40 726.36; 75.40 724.76; 75.40 727.76; 75.40 730.76; 78.40 724.76; 78.40 727.76; 78.40 730.76; 81.40 724.76; 81.40 727.76; 81.40 730.76; 75.40 733.16; 75.40 736.16; 75.40 739.16; 78.40 733.16; 78.40 736.16; 78.40 739.16; 81.40 733.16; 81.40 736.16; 81.40 739.16; 75.40 741.56; 75.40 744.56; 75.40 747.56; 78.40 741.56; 78.40 744.56; 78.40 747.56; 81.40 741.56; 81.40 744.56; 81.40 747.56; 75.40 749.96; 75.40 752.96; 75.40 755.96; 78.40 749.96; 78.40 752.96; 78.40 755.96; 81.40 749.96; 81.40 752.96; 81.40 755.96; 75.40 758.36; 75.40 761.36; 75.40 764.36; 78.40 758.36; 78.40 761.36; 78.40 764.36; 81.40 758.36; 81.40 761.36; 81.40 764.36; 75.40 762.76; 75.40 765.76; 75.40 768.76; 78.40 762.76; 78.40 765.76; 78.40 768.76; 81.40 762.76; 81.40 765.76; 81.40 768.76; 75.40 771.16; 75.40 774.16; 75.40 777.16; 78.40 771.16; 78.40 774.16; 78.40 777.16; 81.40 771.16; 81.40 774.16; 81.40 777.16; 75.40 775.56; 75.40 778.56; 75.40 781.56; 78.40 775.56; 78.40 778.56; 78.40 781.56; 81.40 775.56; 81.40 778.56; 81.40 781.56; 75.40 783.96; 75.40 786.96; 75.40 789.96; 78.40 783.96; 
```

itu, **Inisiasi Kode Biner** berfungsi menerjemahkan nilai kromosom menjadi data yang diperlukan untuk analisis seperti Gambar 7.

```
% Binary Encoding
M = zeros(6, 1);
for n = 6:-1:1 % Input individu length
    M(n,1) = 2^(6-n);
end

% Initialize storage for results
best_fitness_history = zeros(1, niter);
avg_fitness_history = zeros(1, niter);
best_idx_history = zeros(1, niter);
best_coordinates_history = zeros(niter, 12);

%% Generate Initial Population %%
population = struct('individu', {}, 'newfitness_value_complete', {});
for i = 1:npop
```

**Gambar 7** Pseudo-code function Inisiasi Kode Biner

### Iterasi

Dalam pengulangan kode atau *looping*, parameter yang sudah dimasukkan di awal akan digunakan di setiap perulangan yang sudah ditentukan.

### Pengkodean

Dalam setiap variabel diubah menjadi representasi biner dengan panjang bit tertentu. Panjang bit ini memengaruhi solusi yang dihasilkan. Proses ini diimplementasikan menggunakan fungsi `get_coordinates` seperti Gambar 8.

```
%% Function Definitions %%
function coordinates = newget_coordinates(indiv, M)
% Inisialisasi koordinat
x1 = 124.01 + (indiv(:,1:6) .* M) * 16 / (2^6-1); % Absis reinforcing steel
y1 = 9.05 + (indiv(:,7:12) .* M) * 15 / (2^6-1); % Ordinat reinforcing steel
x2 = 108.01 + (indiv(:,13:18) .* M) * 16 / (2^6-1); % Absis reinforcing steel
y2 = 9.05 + (indiv(:,19:24) .* M) * 15 / (2^6-1); % Ordinat reinforcing steel
x3 = 92.01 + (indiv(:,25:30) .* M) * 16 / (2^6-1); % Absis reinforcing steel
y3 = 9.05 + (indiv(:,31:36) .* M) * 15 / (2^6-1); % Ordinat reinforcing steel
x4 = 76.01 + (indiv(:,37:42) .* M) * 16 / (2^6-1); % Absis formwork
y4 = 9.05 + (indiv(:,43:48) .* M) * 15 / (2^6-1); % Ordinat formwork
x5 = 60.01 + (indiv(:,49:54) .* M) * 16 / (2^6-1); % Absis formwork
y5 = 9.05 + (indiv(:,55:60) .* M) * 15 / (2^6-1); % Ordinat formwork
x6 = 103.37 + (indiv(:,61:66) .* M) * 3 / (2^6-1); % Absis TC
y6 = 33.53 + (indiv(:,67:72) .* M) * 3 / (2^6-1); % Ordinat TC
% Output koordinat
coordinates = [x1, y1, x2, y2, x3, y3, x4, y4, x5, y5, x6, y6];
end
```

**Gambar 8** Pengkodean (fungsi `get coordinates`)

### Evaluasi Nilai Fitness

Nilai *fitness* dievaluasi sebagai fungsi objektif, yang merupakan gabungan dari waktu *Hoisting*, *Slewing*, dan *Trolleying*. Cara menghitungnya ditunjukkan dalam *pseudo-code* pada Gambar 9 hingga Gambar 12.

```

1 function fitval = newfitness_value_complete(indiv, M, h_all, dxdy_all, tcr, vh, vw, va, ncs1, ncs2, ncs3);
2 % Get coordinates
3 coordinates = newget_coordinates(indiv, M);
4
5 %% Kodingan fungsi fitness_value
6 % Initialize fitval to a default value
7 fitval = 0;
8
9 % Penalty coefficient
10 penalty_coeff = 1e7;
11
12 % Initialize penalty term
13 penalty = 0;
14
15 % Initialize default value for saving
16 tw1 = 0;
17 tw2 = 0;
18 tw3 = 0;
19 tw4 = 0;
20 tw5 = 0;
21 tw6 = 0;
22
23 % Initialize accumulated TV value
24 accumulated_tv = 0;

```

Gambar 9 Fungsi Fitness\_Value

```

1 function fitval = newfitness_value_complete(indiv, M, h_all, dxdy_all, tcr, vh, vw, va, ncs1, ncs2, ncs3);
2 % Get coordinates
3 coordinates = newget_coordinates(indiv, M);
4
5 %% Kodingan fungsi fitness_value
6 % Initialize fitval to a default value
7 fitval = 0;
8
9 % Penalty coefficient
10 penalty_coeff = 1e7;
11
12 % Initialize penalty term
13 penalty = 0;
14
15 % Initialize default value for saving
16 tw1 = 0;
17 tw2 = 0;
18 tw3 = 0;
19 tw4 = 0;
20 tw5 = 0;
21 tw6 = 0;
22
23 % Initialize accumulated TV value
24 accumulated_tv = 0;

```

Gambar 10 Analisis Waktu Hoisting

```

38 % Looping Centroid Floor 5 to 11atap
39 for c = 1:size(dxdy_current, 1)
40 dx = dxdy_current(c, 1); % X coordinate
41 dy = dxdy_current(c, 2); % Y coordinate
42 % Perhitungan Waktu Slewing
43 % Supply Stockyard Besi (S1)
44 pd = sqrt((dx - coordinates(13))^2 + (dy - coordinates(14))^2);
45 ps1 = sqrt((coordinates(:,1) - coordinates(:,13))^2 + (coordinates(:,2) - coordinates(:,14))^2);
46 if any(pd > tcr) || any(ps1 > tcr)
47 violation_pd = pd - tcr;
48 % Jalankan Violation
49 violation_ps1 = ps1 - tcr;
50 violation = violation_pd + violation_ps1;
51 penalty = penalty + penalty_coeff * violation^2;
52 else
53 pd = pd;
54 ps1 = ps1;
55 end
56 li1 = sqrt((dx-coordinates(:,1)).^2+(dy-coordinates(:,2)).^2);
57 if li1 + ps1 > pd && ps1 + pd > li1 && pd + li1 > ps1
58 tetal = acos((li1^2 - pd^2 - ps1^2) / (2*pd*ps1));
59 else
60 gradienpd = (dy + coordinates(:,14)) ./ (dx + coordinates(:,13));
61 gradienps1 = (coordinates(:,2) + coordinates(:,14)) ./ (coordinates(:,1) + coordinates(:,13));
62 tetal = atan((gradienpd + gradienps1) / (1 + gradienpd .* gradienps1));
63 end
64 tw1 = tetal/vw;
65 supply_1 = [pd ps1 li1 tetal tw1];

```

Gambar 11 Analisis Waktu Slewing

```

188 % Perhitungan Trolleying
189 % Supply Stockyard Besi (S1)
190 ta1 = (pd-ps1)/va;
191 % Supply Bar Bender & Cutter (S2)
192 ta2 = (pd-ps2)/va;
193 % Supply Besi Fabrikasi (S3)
194 ta3 = (pd-ps3)/va;
195 % Supply Stockyard Bekisting (S4)
196 ta4 = (pd-ps4)/va;
197 % Supply Bekisting Fabrikasi (S5)
198 ta5 = (pd-ps5)/va;
199 % Supply Concrete (S6)
200 ta6 = (pd-ps6)/va;
201 % Total time
202 % Hitung total waktu menggunakan accumulated_tv
203 total_time = ((2*accumulated_tv+2*ta1)^nccs2)+((2*accumulated_tv+2*ta2)^nccs2)+((2*accumulated_tv+2*ta3)^nccs2)+((2*accumulated_tv+2*ta4)^nccs2)+((2*accumulated_tv+2*ta5)^nccs2)+((2*accumulated_tv+2*ta6)^nccs2);
204 % Nilai fitness akhir
205 fitval = total_time + penalty;
206 end
207 end
208 end
209 end
    
```

Gambar 12 Analisis Waktu Trolleying

### Elitisme

Proses Elitisme, yang bertujuan untuk mengulang pemilihan kromosom secara efisien, dijalankan oleh fungsi `run_elitisme` sebelum seleksi induk. Ini juga berfungsi untuk memisahkan kode agar program utama tetap bersih seperti pada Gambar 13.

```

1 function elite_individuals = newrun_elitism(population, nelits)
2 % Get the number of individuals in the population
3 pop_size = length(population);
4
5 % Initialize variables to store elite individuals and their fitness values
6 elite_individuals = struct('individu', {}, 'newfitness_value_complete', {});
7 elite_fitness = zeros(1, nelits);
8
9 % Find the elite individuals
10 for i = 1:nelits
11     best_fitness = Inf;
12     best_index = 0;
13
14     for j = 1:pop_size
15         if population(j).newfitness_value_complete < best_fitness
16             best_fitness = population(j).newfitness_value_complete;
17             best_index = j;
18         end
19     end
20
21     elite_individuals(i).individu = population(best_index).individu;
22     elite_individuals(i).newfitness_value_complete = population(best_index).newfitness_value_complete;
23     elite_fitness(i) = best_fitness;
24
25 % Remove the selected elite individual from the population
26 population(best_index) = [];
27 pop_size = pop_size - 1;
28 end
29 end
    
```

Gambar 13 Pseudo-code Elitisme

### Seleksi Induk

Pemilihan kromosom untuk menjadi induk dalam proses penyilangan dilakukan menggunakan teknik **roda roulette**. Tujuan dari teknik ini ada dua: pertama, untuk memperluas area pencarian dengan memungkinkan pemilihan secara acak. Kedua, memberikan peluang lebih besar bagi kromosom dengan nilai *fitness* yang tinggi untuk terpilih dibandingkan dengan yang nilai *fitness*-nya rendah. Pseudo-code untuk seleksi ini dapat dilihat pada Gambar 14.

```

1 function parents = newget_parents(population)
2 fitness_data = zeros(1, length(population));
3
4 % Calculate the fitness values for each individual
5 for i = 1:length(population)
6     fitness_data(i) = population(i).newfitness_value_complete;
7 end
8
9 % Convert fitness values to selection probabilities
10 selection_prob = 1 ./ fitness_data;
11 total_prob = sum(selection_prob);
12 selection_prob = selection_prob / total_prob;
13
14 % Perform roulette wheel selection for parent 1
15 cumulative_prob = cumsum(selection_prob);
16 r1 = rand();
17 selected_index1 = find(r1 <= cumulative_prob, 1, 'first');
18
19 % Perform roulette wheel selection for parent 2
20 r2 = rand();
21 selected_index2 = find(r2 <= cumulative_prob, 1, 'first');
22
23 % Ensure that the two selected parents are different
24 while selected_index1 == selected_index2
25     r2 = rand();
26     selected_index2 = find(r2 <= cumulative_prob, 1, 'first');
27 end
28
29 % Return the selected parents
30 parents = [population(selected_index1), population(selected_index2)];
31
32 end
33
    
```

Gambar 14 Pseudo-code Seleksi Induk dan Roulette Wheel

## Crossover (Penyilangan) dan Mutasi

Penyilangan (crossover) dan mutasi adalah dua proses yang digunakan untuk menciptakan kromosom baru dan menjaga keragaman populasi. Penyilangan bertujuan untuk menghasilkan kromosom anak yang memiliki nilai *fitness* lebih baik dari induknya. Sementara itu, mutasi berperan untuk menjaga populasi tetap beragam dan tidak terjebak pada solusi yang sama.

Metode mutasi yang digunakan di sini adalah mutasi *bit-flipping*, di mana nilai bit pada kromosom dibalik. Kedua proses ini terjadi berdasarkan probabilitas yang telah ditentukan: probabilitas mutasi (*p*mutasi) dan probabilitas penyilangan ( $1/n_{pop}$  atau 0,01). Pseudo-code untuk penyilangan dan mutasi dapat dilihat masing-masing pada Gambar 15, serta Gambar 16 dan Gambar 17.

```

1 function offspring = newpoint_crossover(parents, nindiv, ncross)
2
3     % Extract parent1 and parent2 from the parents struct
4     parent1 = parents(1).individu;
5     parent2 = parents(2).individu;
6
7     % Get the length of the parents
8     len = nindiv;
9
10    % Generate n random crossover points
11    crossover_points = sort(randperm(len-1, ncross));
12
13    % Initialize the offspring
14    offspring1 = parent1;
15    offspring2 = parent2;
16
17    % Perform crossover
18    for i = 1:ncross
19        if mod(i, 2) == 1
20            % Odd-indexed segments: swap genetic material
21            if i == 1
22                offspring1(1:crossover_points(i)) = parent2(1:crossover_points(i));
23                offspring2(1:crossover_points(i)) = parent1(1:crossover_points(i));
24            else
25                offspring1(crossover_points(i-1)+1:crossover_points(i)) = parent2(crossover_points(i-1)+1:crossover_points(i));
26                offspring2(crossover_points(i-1)+1:crossover_points(i)) = parent1(crossover_points(i-1)+1:crossover_points(i));
27            end
28        end
29    end
30
31    % Swap the last segment if ncross is odd
32    if mod(ncross, 2) == 1
33        offspring1(crossover_points(end)+1:end) = parent2(crossover_points(end)+1:end);
34        offspring2(crossover_points(end)+1:end) = parent1(crossover_points(end)+1:end);
35    end
36
37    % Create the offspring struct array
38    offspring = struct('individu', {}, 'newfitness_value_complete', {});
39    offspring(1).individu = offspring1;
40    offspring(2).individu = offspring2;
41 end
  
```

Gambar 15 Pseudo-code crossover (penyilangan)

```

1 function mutated_offspring = newbitflip_mutation(offspring, rmutat)
2
3     % Initialize mutated_offspring struct array
4     mutated_offspring = struct('individu', {}, 'newfitness_value_complete', {});
5
6     % Perform bitflip mutation for each offspring
7     for i = 1:length(offspring)
8         % Get the length of the individual
9         len = length(offspring(i).individu);
10
11        % Generate random numbers for each bit
12        rand_nums = rand(1, len);
13
14        % Create a mask for bits to be mutated
15        mutation_mask = rand_nums < rmutat;
16
17        % Perform bitflip mutation
18        mutated_individu = offspring(i).individu;
19        mutated_individu(mutation_mask) = ~mutated_individu(mutation_mask);
20
21        % Assign mutated individual to mutated_offspring struct array
22        mutated_offspring(i).individu = mutated_individu;
23        mutated_offspring(i).newfitness_value_complete = offspring(i).newfitness_value_complete;
24    end
25
26 end
  
```

Gambar 16 Pseudo-code Mutasi

```

1 function mutated_offspring = newbitflip_mutation_parents(parents, rmutat)
2     % Extract parent1 and parent2 from the parents struct
3     offspring1 = parents(1).individu;
4     offspring2 = parents(2).individu;
5
6     % Get the length of the individuals
7     len1 = length(offspring1);
8     len2 = length(offspring2);
9
10    % Generate random numbers for each bit of offspring1
11    rand_nums1 = rand(1, len1);
12    % Create a mask for bits to be mutated in offspring1
13    mutation_mask1 = rand_nums1 < rmutat;
14    % Perform bitflip mutation on offspring1
15    mutated_offspring1 = offspring1;
16    mutated_offspring1(mutation_mask1) = ~offspring1(mutation_mask1);
17
18    % Generate random numbers for each bit of offspring2
19    rand_nums2 = rand(1, len2);
20    % Create a mask for bits to be mutated in offspring2
21    mutation_mask2 = rand_nums2 < rmutat;
22    % Perform bitflip mutation on offspring2
23    mutated_offspring2 = offspring2;
24    mutated_offspring2(mutation_mask2) = ~offspring2(mutation_mask2);
25
26    % Create the mutated offspring struct
27    mutated_offspring = struct('individu', {}, 'fitness_value', {});
28    mutated_offspring(1).individu = mutated_offspring1;
29    mutated_offspring(2).individu = mutated_offspring2;
30    mutated_offspring(1).fitness_value = parents(1).fitness_value;
31    mutated_offspring(2).fitness_value = parents(2).fitness_value;
32 end

```

Gambar 17 Pseudo-code Mutasi Parents

5. **Validasi dan Kontrol Komparasi Hasil:** Membandingkan hasil simulasi dengan data aktual sebelum optimasi untuk mengukur besaran efisiensi yang dicapai.

### Analisis Total Waktu Rencana Tower Crane

Analisis waktu kerja pengangkatan material menunjukkan bahwa total waktu operasional Rencana Tower Crane sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 TT &= \sum_{m=1}^M (2Tv + 2Tw + 2Ta) + N \\
 &= ((18.537,03 + 3434) + (18.537,03 + 95) + (18.537,03 + 302)) \\
 &= 59.442,05 \text{ menit} \\
 &= 990,70 \text{ jam}
 \end{aligned}$$

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### HASIL

Penempatan pada area supply terdapat pergeseran koordinat yang berbeda-beda yang disajikan seperti pada Tabel 4.

Tabel 3 Perbandingan Koordinat Eksisting dan Rencana

Variabel	Nama	Centroid Koordinat				Pergeseran koordinat X (m)
		Eksisting (m)		Rencana (m)		
		X	Y	X	Y	
Stockyard Besi	S1	132.01	16.56	133.51	16.56	1.50
Bar Bender & Cutter	S2	116.05	16.56	117.51	16.56	1.46
Besi Fabrikasi	S3	100.04	16.56	101.51	16.56	1.47
Stockyard Bekisting	S4	84.03	16.56	85.51	16.56	1.48
Bekisting Fabrikasi	S5	68.01	16.56	69.51	16.56	1.50
Beton Segar	S6	115	35	115.09	35.00	0.09
Tower Crane	TCO	104.87	35.03	107.56	36.17	2.92

Berikut ini adalah hasil dari rekapitulasi dari Eksisting dan Rencana waktu *Hoisting*, *Slewing*, dan *Trolleying* pada Tabel 5.

**Tabel 4** Hasil Waktu Eksisting dan Rencana

No	Waktu Pergerakan	Waktu		Selisih (%)
		Eksisting	Rencana	
1	Waktu <i>Hoisting</i>	811.61 menit	649.29 menit	20.00
2	Waktu <i>Slewing</i>	7913.52 menit	8056.31 menit	1.77
3	Waktu <i>Trolleying</i>	1061.58 menit	1140.63 menit	6.93
4	Waktu Siklus	19573.42 menit	18537.03 menit	5.29
5	Waktu Kerja Total (jam)	1058.48 jam	990.70 jam	6.40

## PEMBAHASAN

Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan efisiensi yang signifikan pada waktu dan biaya operasional Tower Crane setelah penerapan optimasi. Sebelum optimasi, total waktu kerja operasional Tower Crane adalah 1.058,48 jam. Setelah optimasi, total waktu operasional berhasil dikurangi menjadi 990,70 jam. Hal ini merepresentasikan penghematan waktu sebesar 6,40%. Perbandingan ini membuktikan bahwa optimasi mampu memberikan dampak dan terukur pada efisiensi proyek konstruksi. Pengurangan waktu operasional ini secara langsung berkorelasi dengan penurunan biaya.

#### 4. KESIMPULAN

1. Waktu kerja operasional Tower Crane berkurang sebesar 6,40%, dari Waktu Eksisting 1.058,48 jam menjadi Waktu Rencana 990,70 jam.
2. Saran untuk penelitian lanjutan yaitu dapat menjadi acuan bagi praktik manajemen proyek Tower Crane di masa mendatang, serta mendorong lebih banyak penelitian dalam bidang optimasi alat berat.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmegid, M. A., Shawki, K. M., & Abdel-Khalek, H. (2015). GA optimization model for solving tower crane location problem in construction site s. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.011>
- Anggreini, C. D. (2023). Optimasi Penggunaan Alat Berat Pada Pembangunan Gereja Bethany Yestoya Kota Malang. *Jurnal Teknik Sipil ITN Malang*, 5(1).
- Hyun, H., Park, M., Lee, D., & Lee, J. (2021). Tower crane location optimization for heavy unit lifting in high-rise modular construction. *Buildings*, 11(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/buildings11030121>
- Muliawan, H., & Nursin, A. (2022). Optimasi Penempatan Tower Crane terhadap Waktu Siklus pada Proyek X. *Jurnal Teknik Sipil*, 08(01), 22–31. <https://doi.org/10.26760/rekaracana>
- Rostiyanti, S. F. (2008). Alat Berat Untuk Proyek Konstruksi, Edisi Kedua. In *PT. Rineka Cipta*.
- Santosa, F. A. (2024). *PROYEK APARTEMEN BELLA TOWER 3 SURABAYA PROYEK*.
- Suyanto, 2005. *Algoritma Genetika dalam MATLAB*. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Sarker, R. A., & Charles S. Newton. (2008). *Optimization Modelling A Practical Approach*. CRC Press. (Vol. 4, Issue 1).
- Tiyas, A. C. A., & Prasetyono, P. N. (2024). Perhitungan Waktu Siklus Tower Crane Untuk Pekerjaan Pengecoran Pada Proyek Konstruksi ( Case Study Gedung Pringgogidgo Surabaya ). 2(2), 25–31.
- Utari, R. P., & Afrida, I. N. (2023). Analisis Perbandingan Efisiensi Produktivitas Tower Crane Proyek Pembangunan Apartemen Di Surabaya Barat. 08(01), 28–43. <http://ejurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/HEXAGON>
- Wu, K., García, B., Soto, D., & Zhang, F. (2020). Automation in Construction Spatio-temporal planning for tower cranes in construction projects with simulated annealing. *Automation in Construction*, 111(June 2019), 103060. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103060>