

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas metodologi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi jaringan pipa yang meliputi deskripsi masalah, menjelaskan tahapan penelitian, formulasi model optimisasi, teknik penyelesaian serta contoh kasus dengan menggunakan *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA).

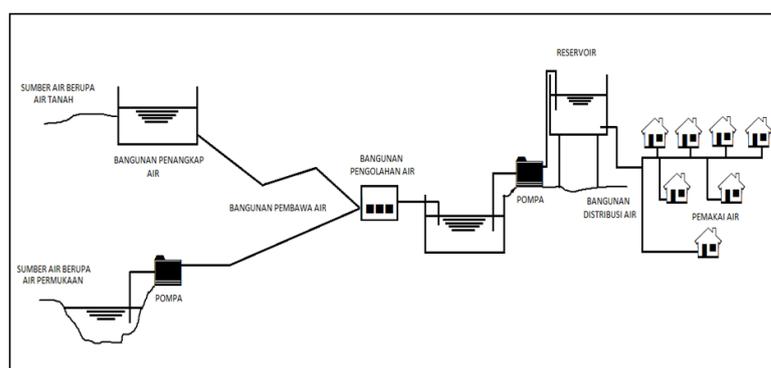
#### 3.1 Deskripsi Masalah

Jaringan distribusi air terdiri dari sejumlah pipa yang menghubungkan titik-titik utama, seperti *reservoir*, bak penampung tertutup (BPT), dan pelanggan. Misalkan terdapat  $n$  buah pipa dalam jaringan distribusi air. Setiap pipa memiliki panjang tertentu dan dapat dipilih dari  $m$  opsi diameter standar yang tersedia. Pemilihan diameter yang tidak tepat dapat menyebabkan tekanan yang terlalu rendah (menyebabkan gangguan layanan) atau terlalu tinggi (menyebabkan pemborosan energi dan risiko kerusakan pipa), serta berdampak langsung terhadap biaya total sistem. Oleh karena itu, permasalahan ini menjadi sebuah proses optimisasi yang kompleks dan bersifat kombinatorial, karena banyaknya kemungkinan konfigurasi diameter yang harus dievaluasi.

Selain itu, permasalahan optimisasi ini juga tergolong sebagai optimisasi *single-objective*, dengan dua tujuan utama, yaitu meminimalkan biaya total sistem, yang terdiri dari biaya material pipa berdasarkan panjang dan diameter pipa, serta memastikan kinerja hidraulik yang sesuai, seperti tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam batas toleransi sesuai standar teknis.

Dalam konteks ini, setiap pipa dalam jaringan dianggap sebagai variabel keputusan, dan nilai dari variabel tersebut adalah diameter yang dipilih dari himpunan diskrit. Dengan mempertimbangkan sifat diskrit dari diameter pipa dan kompleksitas struktur jaringan, permasalahan ini tidak cocok diselesaikan dengan metode konvensional deterministik, melainkan lebih efektif menggunakan pendekatan berbasis algoritma evolusioner.

Penelitian ini memanfaatkan *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA) yang dirancang untuk menangani permasalahan kombinatorial berskala besar dengan variabel diskrit. Pendekatan ini menggabungkan representasi kromosom berbasis alfanumerik dengan operator-operator seleksi dan mutasi yang dimodifikasi menggunakan *Gray Code*. Tujuannya adalah untuk meningkatkan efisiensi pencarian solusi optimal, menghindari konvergensi prematur, dan tetap menjaga keberagaman populasi solusi. Ilustrasi jaringan pipa terdapat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Ilustrasi Jaringan Pipa

Secara khusus, penelitian ini membahas optimisasi penentuan diameter pipa pada jaringan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM). Diameter pipa dikatakan optimal apabila mampu memenuhi kebutuhan hidraulik sistem seperti debit dan tekanan minimum dengan menggunakan ukuran sekecil mungkin yang masih sesuai dengan kondisi operasional. Semakin besar diameter pipa yang dipilih, maka semakin tinggi pula biaya investasi dan operasional. Oleh karena itu, pemilihan diameter yang efisien menjadi kunci dalam menekan total biaya sistem tanpa mengorbankan kinerja distribusi air.

Permasalahan ini menjadi krusial mengingat proporsi biaya pipa terhadap total biaya pembangunan SPAM sangat signifikan. Maka dari itu, jaringan distribusi perlu dioptimalkan sedemikian rupa agar mampu menyalurkan debit air yang memadai ke seluruh titik layanan dengan tekanan yang sesuai, namun tetap menggunakan diameter pipa minimum yang layak.

Dalam penelitian ini, penyelesaian dilakukan dengan *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA), yang dipilih karena kemampuannya dalam menangani permasalahan optimisasi kombinatorial berskala besar dengan variabel diskrit.

Anisa Nur Aidah, 2025

**OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi diameter pipa yang optimal dalam hal efisiensi biaya dan kinerja hidraulik.

### 3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi Pustaka

Pada tahapan ini dilakukan studi pustaka dengan mempelajari teori-teori terkait masalah optimisasi *single-objective* dan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA) dari buku dan jurnal.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari desain jaringan pipa, data kebutuhan air, pipa, tekanan aliran air, serta data biaya per diameter pipa HDPE pada tahun 2025.

3. Pembangunan Model Optimisasi

Pada tahapan ini akan dibangun model optimisasi *linear integer programming* dari masalah optimisasi jaringan pipa dengan terlebih dahulu mendefinisikan asumsi-asumsi.

4. Penyelesaian Masalah

Pada tahapan ini, model optimisasi jaringan distribusi SPAM akan diselesaikan dengan menggunakan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA).

5. Implementasi

Model dan teknik akan diimplementasikan pada permasalahan optimisasi jaringan distribusi SPAM di PDAM Tirta Raharja Kabupaten Bandung dengan menggunakan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA).

6. Validasi

Model dan teknik penyelesaian akan divalidasi dengan cara membandingkan hasil dari perhitungan komputerisasi dengan EPANET pada jaringan distribusi SPAM di PDAM Tirta Raharja Sadu Kabupaten Bandung. Validasi membandingkan hasil simulasi seperti tekanan, kecepatan aliran, dan kehilangan tekanan (*head loss*) dengan hasil komputerisasi.

## 7. Penarikan Kesimpulan

Pada tahapan ini akan dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil implementasi Algoritma Pseudo-Genetika (PGA).

### 3.3 Model Optimisasi

Pada bagian ini diturunkan model optimisasi jaringan pipa distribusi SPAM. Adapun asumsi-asumsi yang diambil pada pemodelan ini adalah sebagai berikut:

1. Kedalaman galian tidak diperhitungkan.
2. Skenario (jam puncak, siang, atau malam) tidak diperhatikan.
3. Aksesoris pipa dan belokan tidak dipertimbangkan.
4. Tekanan 1 bar sama dengan 10 meter.
5. Jenis pipa yang digunakan merupakan pipa HDPE.

Untuk menurunkan model optimisasi jaringan distribusi SPAM, terlebih dahulu didefinisikan himpunan-himpunan yang digunakan oleh model sebagai berikut:

#### 1. Indeks:

- $i$  : Indeks individu dalam populasi
- $j$  : Indeks pipa pada jaringan pipa
- $k$  : Indeks *node* pada jaringan pipa

#### 2. Himpunan

- $N_{VD}$  : Himpunan pipa dalam jaringan
- $N_R$  : Himpunan *node* dalam jaringan

#### 3. Parameter

- $L_j$  : Panjang masing-masing pipa dalam jaringan
- $C_j$  : Biaya per satuan panjang pipa
- $H_{min,k}$  : Tekanan minimum yang harus dipenuhi di *node* pelanggan  $k$
- $V_{max,k}$  : Kecepatan aliran maksimum dalam pipa di *node*  $k$
- $V_{min,k}$  : Kecepatan aliran minimum dalam pipa di *node*  $k$
- $C$  : Koefisien Hazen-Williams, menunjukkan kehalusan pipa

- $g$  : Percepatan gravitasi ( $9.81m/s^2$ )  
 $h_f$  : *Head loss* (kehilangan tekanan)  
 $Q_j$  : Debit aliran pipa  $j$  dalam meter kubik per detik ( $m^3/s$ )  
 $H_{reservoir}$  : Tekanan awal dari *reservoir* dalam meter ( $m$ )  
 $d_k$  : Jumlah air yang dibutuhkan oleh pelanggan di *node k* ( $m^3/s$ )  
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  : Bobot penalti untuk pelanggaran kendala ( $10^7$ )

#### 4. Variabel Keputusan

Variabel yang dipilih untuk dioptimalkan dalam model ini adalah:

- a. Diameter pipa yang dipilih untuk pipa ke- $j$  oleh individu ke- $i$

$$X_j^i$$

Menentukan ukuran pipa yang digunakan untuk setiap segmen  $j$ . Diameter dipengaruhi oleh debit dan tekanan karena diameter memengaruhi *head loss* (kehilangan tekanan).

- b. Debit aliran di setiap pipa

$$Q_j X_j^i$$

Besar aliran yang melewati pipa  $j$  berdasarkan solusi individu  $i$  yang dipengaruhi oleh keseimbangan aliran (*flow continuity*) di setiap *node*.

- c. Tekanan di setiap *node*

$$H_k$$

Tekanan di *node k*, harus memenuhi tekanan minimum di titik pelanggan. Tekanan dipengaruhi oleh *head loss* yang terjadi akibat aliran dalam pipa.

- d. Kecepatan aliran di setiap pipa

$$V_j$$

Kecepatan aliran air pada pipa  $j$ , yang dipengaruhi oleh diameter pipa dan debit aliran.

- e. Tekanan memenuhi batas atau tidak

$$\delta_k$$

Variabel biner (0 atau 1) yang menunjukkan apakah tekanan atau kecepatan di *node k* memenuhi batas atau tidak.

- f. Kecepatan memenuhi batas atau tidak

$$\delta_j$$

Variabel biner (0 atau 1) yang menunjukkan apakah tekanan atau kecepatan di pipa  $j$  memenuhi batas atau tidak.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan diameter pipa-pipa pada sebuah jaringan yang optimal sehingga biaya total jaringan pipa dapat diminimalkan, dengan tetap menjaga batasan hidraulik (tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam batas yang diizinkan). Diasumsikan bahwa biaya per satuan panjang pipa tidak berkaitan secara linier dengan diameternya, yaitu meskipun diameter bertambah, kenaikan biaya per satuan panjang tidak mengikuti pola yang lurus. Namun, satu persamaan biaya dapat digunakan untuk semua ukuran pipa. Oleh karena itu, biaya total jaringan pipa (termasuk biaya pemasangan) serta memastikan bahwa sistem jaringan pipa memenuhi batasan hidraulik yang telah ditetapkan dapat dinyatakan dalam fungsi objektif berikut:

**Meminimumkan:**

$$\begin{aligned}
 F(X) = & \sum_{j=1}^{N_{VD}} C_j(X_j^i)L_i + \lambda_1 \sum_{k=1}^{N_R} \delta_k(H_{min,k} - H_k) \\
 & + \lambda_2 \sum_{j=1}^{N_{VD}} \delta_j(V_{max,j} - V_j) \\
 & + \lambda_3 \sum_{j=1}^{N_{VD}} \delta_j(V_j - V_{min,j})
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Penjelasan mengenai fungsi objektif:

1. Biaya total pemasangan pipa

$$\sum_{j=1}^{N_{VD}} C_j(X_j^i)L_i$$

- $X_j^i$ : diameter pipa yang dipilih untuk pipa ke- $j$  dalam individu ke- $i$ .
- $C_j(X_j^i)$ : biaya pemasangan per satuan panjang berdasarkan diameter  $X_j^i$ .

Anisa Nur Aidah, 2025

*OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)*

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

- Komponen ini menghitung total biaya pemasangan jaringan pipa dengan mempertimbangkan panjang pipa  $L_i$  dan biaya per satuan panjang  $C_j$ .

2. Penalti kekurangan tekanan

$$\lambda_1 \sum_{k=1}^{N_R} \delta_k (H_{min,k} - H_k)$$

- $\delta_k$ : variabel indikator penalti yang bernilai 1 jika  $H_k < H_{min,k}$ , dan 0 jika tidak.
- Jika  $H_k < H_{min,k}$  maka penalti diterapkan  $\lambda_1 (H_{min,k} - H_k)$
- Jika tekanan sudah memenuhi batas, penalti ini bernilai nol.

3. Penalti kecepatan melebihi batas maksimum

$$\lambda_2 \sum_{j=1}^{N_{VD}} \delta_j (V_{max,j} - V_j)$$

- $\delta_j$ : variabel indikator penalti yang bernilai 1 jika  $V_j > V_{max,k}$ , dan 0 jika tidak.
- Jika  $V_j > V_{max,j}$  maka penalti diterapkan  $\lambda_2 (V_{max,j} - V_j)$
- Jika kecepatan berada dalam batas, penalti ini tidak dihitung.

4. Penalti kecepatan di bawah batas minimum

$$\lambda_3 \sum_{j=1}^{N_{VD}} \delta_j (V_j - V_{min,j})$$

- $\delta_j$ : variabel indikator penalti yang bernilai 1 jika  $V_j < V_{min,j}$ , dan 0 jika tidak.
- Jika  $V_j < V_{min,j}$  maka penalti diterapkan  $\lambda_3 (V_{min,j} - V_j)$
- Jika kecepatan sudah memenuhi batas, penalti ini tidak dihitung.

Secara keseluruhan, fungsi objektif ini memastikan bahwa desain jaringan pipa tidak hanya ekonomis tetapi juga memenuhi batasan hidraulik seperti tekanan minimum di setiap *node* serta batasan kecepatan aliran dalam pipa, sehingga sistem dapat beroperasi dengan optimal dan efisien.

Dalam model optimisasi jaringan distribusi air, air berasal dari sumber utama (misalnya, *reservoir* atau pompa), kemudian mengalir melalui pipa-pipa distribusi hingga mencapai pelanggan di berbagai *node*. Model ini harus memastikan bahwa:

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

1. Aliran air memenuhi permintaan pelanggan di setiap *node*.
2. Tekanan pada setiap *node* cukup agar air dapat mencapai pelanggan.
3. Debit dalam setiap pipa sesuai dengan kapasitasnya.
4. Biaya total minimum, dengan mempertimbangkan pemilihan diameter pipa yang optimal.

Untuk menjamin hal ini, model memerlukan beberapa kendala yaitu sebagai berikut:

1. Kendala Kontinuitas Aliran (Keseimbangan Aliran)

Secara teoritis, hukum kontinuitas aliran dalam mekanika fluida menyatakan bahwa debit aliran yang masuk ke dalam suatu sistem harus sama dengan yang keluar, apabila tidak ada akumulasi. Dalam konteks jaringan pipa, Nugroho dkk. (2018) menyatakan persamaan hukum kontinuitas sebagai berikut:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (3.2)$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 + A_3 v_3 \quad (3.3)$$

Keterangan:

$Q_i$  : debit aliran ( $m^3/s$ )

$A_i$  : luas penampang pipa ke- $i$  ( $m^2$ )

$v_i$  : kecepatan aliran dalam pipa ke- $i$  ( $m/s$ )

Persamaan ini menggambarkan bahwa dalam sistem percabangan pipa, jumlah debit total dari pipa masuk akan dibagi menjadi beberapa debit keluar, dengan mempertimbangkan kecepatan dan luas penampang masing-masing pipa.

Dalam konteks pemodelan matematis optimisasi jaringan distribusi air, prinsip kontinuitas ini diterapkan untuk memastikan keseimbangan aliran pada setiap *node*. Hal ini dirumuskan sebagai berikut (Tobing, 2009):

$$\sum_{j=1} Q_{j,k} - Q_j = 0, j = 1, 2, 3, \dots, N_R \quad (3.4)$$

Keterangan:

$j$  adalah *node* ke- $j$  dalam jaringan

$Q_{j,k}$  adalah aliran dalam pipa  $j$  yang terhubung ke *node*  $k$  ( $m^3/s$ )

$Q_j$  adalah *Supply* (+) atau *demand* (-) pada *nod* ke- $j$

$N_R$  adalah jumlah *node* dalam jaringan

Aliran yang menuju suatu *node* dianggap positif terhadap *node* tersebut, dan sebaliknya. Konsekuensi dari Hukum Kirchoff-I adalah jumlah *supply* dan *demand* dalam jaringan haruslah sama dengan nol, atau (Tobing, 2009):

$$\sum_{j=1} Q_j = 0$$

Identifikasi *node* dalam jaringan:

Jika *demand* > 0 maka *node* ini adalah pelanggan (mengonsumsi air)

Jika *demand* = 0 maka *node* ini hanya sebagai simpul distribusi

Jika *demand* < 0 maka *node* ini adalah sumber air (*reservoir* atau sumur bor)

Identifikasi digunakan untuk memastikan bahwa jaringan dirancang untuk memenuhi kebutuhan air di setiap *node* dengan aliran dan tekanan yang cukup.

## 2. Kendala Tekanan Minimum

Agar pelanggan dapat menerima air dengan tekanan yang cukup, tekanan pada setiap *node* harus memenuhi batas minimum (Mora-Melia dkk., 2013):

$$H_k \geq H_{min,k} \quad \forall k \in N_R \quad (3.5)$$

Gunakan persamaan Hazen-Williams untuk menghitung kehilangan tekanan dalam pipa (Jamil dan Mujeebu, 2019):

$$h_f = \frac{10,67L_j}{C^{1,852}X_j^{4,87}} Q_j^{1,852}, \quad \forall j \in N_{VD} \quad (3.6)$$

Keterangan:

$h_f$  : kehilangan tekanan (*m*)

$L_j$  : panjang pipa *j* (*m*)

$C$  : koefisien Hazen-williams

$X_j^i$ : diameter pipa yang dipilih untuk pipa ke-*j* dalam individu ke-*i*.

$Q_j$ : aliran dalam pipa *j* ( $m^3/s$ )

Semakin kecil  $X_j^i$  maka semakin besar kehilangan tekanan. Tekanan di *node* *k* bergantung pada tekanan di *reservoir* dikurangi kehilangan tekanan akibat gesekan dalam pipa (Wisittipanich dan Buakum, 2019).

$$H_k = H_{reservoir} - h_f \quad (3.7)$$

Jika tekanan lebih rendah dari  $H_{min,k}$ , pelanggan tidak akan mendapatkan air dengan cukup.

$H_{min,k}$  : tekanan minimum yang dibutuhkan, biasanya 15 m

$H_{max,k}$  : tekanan maksimal sebelum menyebabkan kebocoran atau kerusakan, biasanya 70 m

### 3. Kendala Kecepatan Aliran dalam Pipa

Kecepatan air dalam pipa harus dalam rentang tertentu untuk mencegah kerugian tekanan yang berlebihan dan penumpukan sedimen (Mora-Melia dkk., 2013) dengan acuan rumus awal pada Persamaan 3.2 dan 3.3:

$$V_{min,j} \leq V_j \leq V_{max,j} \quad (3.8)$$

$$V_{min,j} \leq \frac{4Q_j}{\pi X_j^2} \leq V_{max,j} \quad (3.9)$$

Kecepatan aliran dalam pipa tidak boleh melebihi batas maksimum, serta kecepatan aliran harus cukup tinggi untuk mencegah sedimentasi dan stagnasi aliran.

$V_{min,j}$  : kecepatan minimum aliran (biasanya 0.3 – 0.6 m/s ) untuk mencegah endapan dan stagnasi air.

$V_{max,j}$  : kecepatan maksimum aliran (biasanya 2.5 – 3 m/s) untuk mencegah kehilangan tekanan dan erosi dinding pipa.

### 3.4 Penyelesaian Model dengan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA)

Pada bagian ini, model optimisasi untuk jaringan distribusi air bersih diselesaikan dengan menggunakan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA). Algoritma ini merupakan pengembangan dari Algoritma Genetika konvensional (*Genetic Algorithm/GA*), dengan beberapa penyesuaian agar lebih cocok digunakan dalam penyelesaian masalah optimisasi jaringan pipa yang kompleks. Tujuan utamanya adalah mendapatkan solusi yang tidak hanya efisien dari sisi biaya, tetapi juga memenuhi syarat teknis hidraulik.

Dalam penerapannya, terdapat beberapa istilah penting yang digunakan dalam PGA:

Anisa Nur Aidah, 2025

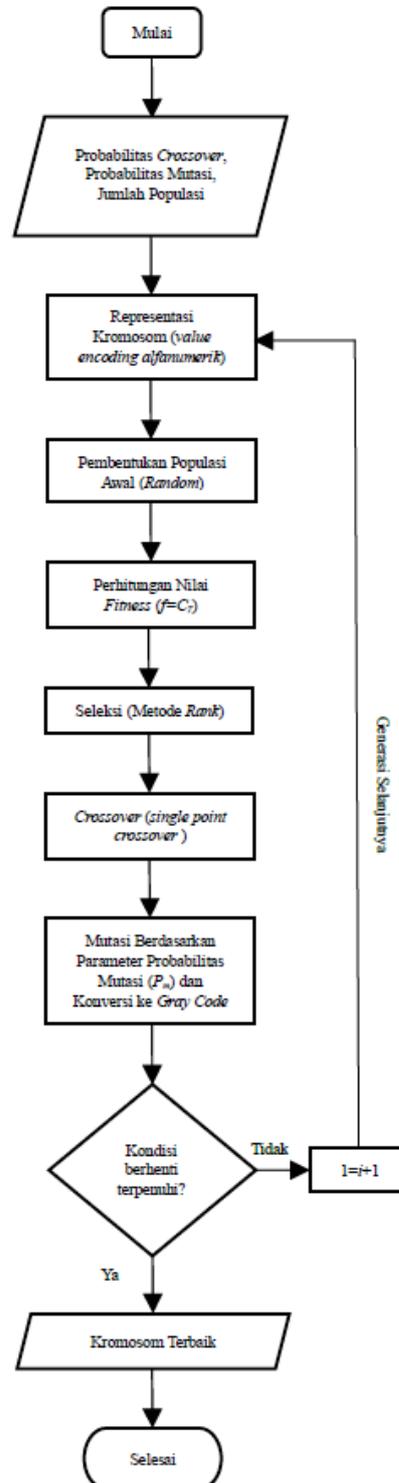
OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

1. *Encoding* merupakan tahap awal di mana konfigurasi diameter pipa dikodekan ke dalam bentuk kromosom alfanumerik. Proses ini penting agar data dapat diproses dalam algoritma optimisasi.
2. Populasi adalah kumpulan solusi awal. Setiap anggota populasi (disebut kromosom) mewakili kombinasi diameter pipa yang mungkin dalam jaringan.
3. *Fitness value* digunakan untuk menilai seberapa baik solusi yang dihasilkan. Penilaian ini mempertimbangkan dua aspek utama, yaitu total biaya instalasi dan kinerja hidraulik, seperti tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam pipa.
4. Seleksi dilakukan untuk memilih kromosom terbaik dari populasi yang ada. Kromosom-kromosom terpilih ini akan digunakan untuk menghasilkan solusi baru melalui proses reproduksi.
5. *Crossover* adalah proses penggabungan dua solusi (induk) untuk membentuk solusi baru (anak) yang memiliki kombinasi karakteristik dari keduanya.
6. Mutasi dengan *Gray Code* merupakan variasi mutasi yang digunakan agar perubahan pada kromosom tidak terlalu drastis. *Gray Code* membantu menjaga kestabilan perubahan diameter pipa, sekaligus memperluas pencarian solusi.
7. Konvergensi terjadi ketika algoritma tidak lagi menghasilkan peningkatan signifikan dalam beberapa generasi, yang menandakan bahwa solusi yang dihasilkan sudah cukup optimal.
8. Batasan hidraulik adalah syarat-syarat teknis yang harus dipenuhi oleh jaringan, seperti tekanan minimum di *node* pelanggan dan batas kecepatan aliran dalam pipa, agar sistem tetap aman dan berfungsi sebagaimana mestinya.
9. Optimisasi multi-objektif digunakan karena tujuan dari penelitian ini bukan hanya satu. Selain menekan biaya, sistem juga harus mampu menjaga performa teknis, terutama dari sisi tekanan dan aliran.

Proses penerapan algoritma ini dalam menentukan diameter optimum pipa ditunjukkan pada Gambar 3.2, yang memperlihatkan alur kerja metode PGA mulai dari pembentukan populasi hingga evaluasi solusi terbaik. Metode Algoritma Pseudo-Genetika (PGA) melalui tujuh tahap, yaitu representasi kromosom, pembentukan populasi awal, menghitung nilai *fitness*, seleksi, *crossover*, dan

mutasi dengan bantuan *Gray Code*, serta evaluasi ulang nilai *fitness*. Berikut adalah tahapan distribusi jaringan pipa dengan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA).



Gambar 3.2 Penerapan PGA untuk Menentukan Diameter Optimum Pipa

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

### 3.4.1 Inisialisasi Parameter

Parameter yang akan diinisialisasi pada awal adalah probabilitas *crossover*, probabilitas mutasi, jumlah populasi pada setiap generasi serta jumlah generasi maksimum yang ditetapkan:

1. Probabilitas *crossover* ( $P_c$ ): Probabilitas yang menentukan seberapa sering *crossover* (pertukaran Genetika) terjadi antara pasangan individu dalam populasi. Nilai ini biasanya diatur antara 0.6 hingga 0.9.
2. Probabilitas mutasi ( $P_m$ ): Probabilitas yang menentukan seberapa sering mutasi terjadi pada gen dalam individu. Nilai ini biasanya diatur rendah, antara 0.01 hingga 0.1, untuk menjaga stabilitas populasi.
3. Jumlah populasi: Jumlah individu dalam populasi pada setiap generasi. Jumlah ini dapat bervariasi, tergantung pada kompleksitas masalah dan sumber daya komputasi yang tersedia. Nilai umum berkisar antara 50 hingga 200 individu.
4. Jumlah generasi maksimum: Jumlah generasi yang akan dievolusikan oleh algoritma. Biasanya diatur berdasarkan kriteria konvergensi atau batas waktu komputasi. Untuk masalah yang relatif sederhana dengan sedikit variabel dan ruang solusi yang tidak terlalu besar, jumlah generasi maksimum dapat diatur antara 100 hingga 200 generasi. Untuk masalah menengah berada di antara 200 hingga 500 generasi serta untuk masalah yang sangat kompleks generasi maksimum dapat mencapai 1000 generasi atau lebih.

### 3.4.2 Representasi Kromosom

Pada tahap ini dilakukan representasi awal kromosom dalam kasus jaringan pipa, kromosom mengkodekan berbagai elemen dan parameter yang membentuk jaringan pipa. Kromosom direpresentasikan dalam bentuk *value encoding*, yaitu alfanumerik yang merepresentasikan suatu diameter solusi dalam satu segmen pipa. Panjang kromosom ditentukan oleh banyaknya pipa dalam distribusi jaringan pipa air. Misalkan terdapat 4 ukuran diameter pipa yang berbeda, setiap gen dapat menyimpan nilai antara A dan D, di mana A sesuai dengan diameter terkecil dari rentang tersebut dan D sesuai dengan diameter terbesar dari rentang tersebut. Salah satu contoh kromosom dari permasalahan tersebut yang terdiri dari 3 pipa yaitu, C A B.

Anisa Nur Aidah, 2025

**OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

### 3.4.3 Pembentukan Populasi Awal

Untuk membentuk populasi awal, beberapa kromosom dihasilkan secara acak dalam bentuk alfanumerik yang mewakili solusi jaringan pipa sebanyak  $K$  kromosom. Setiap kromosom dalam populasi awal mewakili konfigurasi jaringan pipa yang berbeda. Ukuran untuk populasi tergantung pada masalah yang akan diselesaikan dan jenis operator Genetika yang akan diimplementasikan.

### 3.4.4 Menghitung Nilai *Fitness*

Nilai *fitness* digunakan untuk mengevaluasi kualitas setiap solusi (kromosom). Dalam konteks jaringan pipa, nilai *fitness* dapat dihitung berdasarkan biaya total pemasangan pipa per satuan meter dengan tetap menjaga batasan hidraulik (tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam batas yang diizinkan). Nilai *fitness* dijadikan acuan dalam mencapai nilai optimal sehingga semakin kecil biayanya nilai *fitness* semakin kecil dan sebaliknya. Fungsi *fitness* yang digunakan adalah Persamaan 3.1.

### 3.4.5 Seleksi

Dalam implementasi PGA untuk optimisasi jaringan distribusi air menerapkan seleksi berbasis *ranking* sebagai teknik utama. Metode ini terbukti efektif dalam menjaga keragaman genetika sekaligus mendorong evolusi solusi yang lebih baik di setiap generasi, tanpa menyebabkan dominasi individu tertentu secara berlebihan. Pemilihan metode seleksi yang tepat sangat krusial, terutama dalam permasalahan berskala besar seperti optimisasi jaringan distribusi air, karena secara langsung mempengaruhi kecepatan konvergensi serta kualitas dan stabilitas solusi akhir yang dihasilkan. Bertujuan untuk menentukan kromosom yang akan dipertahankan ke generasi berikutnya berdasarkan nilai fungsi objektifnya. Setiap kromosom dalam populasi diberikan probabilitas pemilihan yang berada dalam rentang antara probabilitas maksimum  $p_{max}$  dan probabilitas minimum  $p_{min}$  (Mora-Melia dkk., 2013). Probabilitas seleksi dihitung menggunakan rumus (Mora-Melia dkk., 2013):

$$p_{max} = \frac{\beta}{N_C}, p_{min} = \frac{2 - \beta}{N_C} \quad (3.10)$$

dengan:

- $\beta$  adalah konstanta dengan nilai antara 1.5 hingga 2,
- $N_C$  adalah jumlah kromosom dalam populasi.

Selanjutnya, probabilitas seleksi untuk masing-masing kromosom dihitung dengan rumus (Whitley, 2000):

$$p_i = p_{min} + \left( \frac{Rangking - 1}{N_C - 1} \right) \times (p_{max} - p_{min}) \quad (3.11)$$

Kromosom dengan nilai fungsi objektif yang lebih kecil (lebih optimal) memiliki probabilitas pemilihan yang lebih tinggi, sedangkan kromosom dengan nilai fungsi objektif yang lebih besar memiliki probabilitas yang lebih rendah. Hal ini memastikan bahwa solusi yang lebih baik lebih mungkin dipertahankan, tetapi tetap memberikan peluang bagi kromosom dengan solusi suboptimal untuk bertahan, sehingga menjaga keberagaman populasi dan menghindari jebakan lokal minimal.

### 3.4.6 Crossover

Pasangan kromosom yang telah lolos proses seleksi kemudian dipilih secara acak sebelum dilakukan proses *crossover*. *Crossover* adalah proses persilangan dua kromosom untuk membentuk kromosom baru yang lebih baik dari pada induk. Proses *crossover* dilakukan dengan menggunakan metode *single point crossover*. *Crossover* memiliki parameter probabilitas *crossover* ( $P_c$ ), dengan nilai  $P_c$  antara 0 sampai 1. Kemudian pilih sebuah bilangan acak antara 0 sampai 1. Jika bilangan acak yang dipilih kurang dari  $P_c$  maka dilakukan *crossover*. Jika bilangan acak yang dipilih lebih dari  $P_c$  maka tidak terjadi *crossover*.

### 3.4.7 Mutasi

Proses mutasi diterapkan pada populasi yang diperoleh setelah proses *crossover*. Setelah ditetapkan, frekuensi mutasi untuk setiap gen dari setiap kromosom diperiksa ketika sebuah individu dibuat dari induknya. Jika huruf yang dihasilkan secara acak berada di bawah probabilitas tersebut, gen akan berubah. Kegunaan dari proses ini diwujudkan dalam perluasan area pencarian dalam ruang solusi yang layak.

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

### 3.4.8 Seleksi Kembali

Seleksi kembali dilakukan untuk memilih kromosom terbaik dari generasi baru untuk memastikan generasi berikutnya memiliki kualitas yang lebih baik. Kondisi berhenti terpenuhi saat generasi sudah mencapai jumlah maksimum yang telah ditentukan serta jika tidak ada perubahan signifikan dalam nilai *fitness* terbaik dalam populasi selama sejumlah generasi berturut-turut.

Langkah-langkah *Pseudo Genetic Algorithm* (PGA):

1. Pilih satu kromosom secara acak dari populasi.
2. Pilih satu gen secara acak dari kromosom yang dipilih.
3. Tentukan nilai mutasi dengan menghasilkan nilai acak antara 0 dan 1. Jika nilai acak lebih kecil dari  $P_m$ , maka ubah nilai gen. Jika nilai acak lebih besar dari  $P_m$ , maka nilai gen tetap sama sehingga tidak terjadi mutasi.
4. Ubah nilai gen dengan mutasi *Gray Code*, yaitu ganti nilai gen dengan nilai acak yang diizinkan untuk gen tersebut. Misalkan dengan memilih huruf sebelum atau selanjutnya dari huruf yang dipilih.
5. Kromosom yang telah dimutasi akan dimasukkan kembali dalam populasi.
6. Seleksi kembali dilakukan untuk memilih kromosom terbaik dari generasi baru untuk memastikan generasi berikutnya memiliki kualitas yang lebih baik.
7. Ulangi langkah 1 hingga 8 untuk kromosom lain dalam populasi.

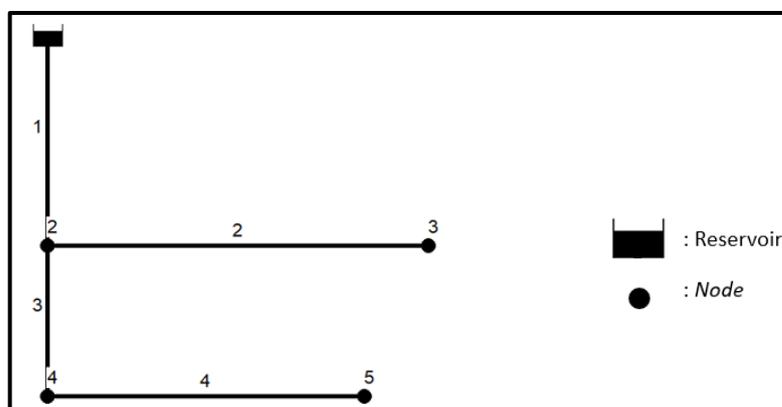
Ulangi langkah-langkah tersebut hingga mencapai generasi maksimum sehingga diperoleh solusi terbaik PGA.

### 3.5 Contoh Kasus

Metode PGA yang diusulkan menguji evolusi populasi acak melalui paralelisme yang mirip dengan hukum seleksi alam yang terjadi pada GA klasik. Hal ini diperoleh melalui tiga proses dasar: reproduksi, *crossover*, dan mutasi. Proses optimisasi dimulai dengan pembuatan satu *set* kromosom, yang masing-masing berisi solusi yang mungkin untuk masalah optimisasi. Generasi pertama sepenuhnya acak. Kromosom-kromosom tersebut diurutkan berdasarkan kecocokannya. Dalam masalah desain, kesesuaian kromosom tertentu ditentukan oleh biaya yang terkait dengan desain jaringan pipa.

### 3.5.1 Identifikasi Jaringan Pipa

Setiap gen mewakili diameter pipa yang berbeda. Panjang kromosom ditentukan oleh banyaknya pipa dalam distribusi jaringan pipa air. Misalkan terdapat 4 ukuran diameter pipa yang berbeda, setiap gen dapat menyimpan nilai antara A dan D, di mana A sesuai dengan diameter terkecil dari rentang tersebut dan D sesuai dengan diameter terbesar dari rentang tersebut. Gambar 3.3 menunjukkan desain jaringan distribusi air pada contoh kasus, Tabel 3.1 menyajikan data panjang pipa yang digunakan pada contoh kasus, dan Tabel 3.2 menampilkan data kebutuhan air (*demand*) pada setiap *node* yang terhubung dengan jaringan pipa dalam contoh kasus.



Gambar 3.3 Desain Jaringan Pipa pada Contoh Kasus

Tabel 3.1 Data Panjang Pipa pada Contoh Kasus

Pipa	Node	Panjang Pipa (m)
Pipa 1	1 → 2	500
Pipa 2	2 → 3	700
Pipa 3	2 → 4	400
Pipa 4	4 → 5	600

Tabel 3.2 Data *Demand Node* pada Contoh Kasus

Node	<i>Demand Node</i> ( $m^3/s$ )
Node 2	0
Node 3	0.010

<i>Node</i>	<i>Demand Node (m<sup>3</sup>/s)</i>
<i>Node 4</i>	0
<i>Node 5</i>	0.012

### 3.5.2 Pembentukan Populasi Awal

PGA secara acak akan menghasilkan populasi awal dalam bentuk bilangan cacah yang mewakili solusi jaringan pipa distribusi sebanyak  $K$  kromosom. Misalkan dibangkitkan 3 kromosom dengan 4 gen masing-masing. Tabel 3.3 merupakan data diameter beserta biaya pipa, Tabel 3.4. merupakan contoh dari populasi awal.

Tabel 3.3 Data Diameter beserta Biaya Pipa pada Contoh Kasus

<b>Diameter (mm)</b>	<b>Alfanumerik</b>	<b>Biaya (Rp/m)</b>
150	A	500
200	B	700
250	C	900
300	D	1100

Tabel 3.4 Inisialisasi Populasi Awal pada Contoh Kasus

<b>Kromosom</b>	<b>Pipa 1</b>	<b>Pipa 2</b>	<b>Pipa 3</b>	<b>Pipa 4</b>
Kromosom 1	A	C	B	D
Kromosom 2	B	B	A	C
Kromosom 3	C	A	D	B

### 3.5.3 Menghitung Nilai *Fitness*

Nilai *fitness* menyatakan nilai baik tidaknya individu yang menjadi solusi tersebut. Nilai *fitness* dijadikan acuan dalam mencapai nilai optimal. Yang merepresentasikan kualitas sebuah kromosom sebagai solusi. Nilai *fitness* dapat dihitung berdasarkan biaya total pemasangan pipa per satuan meter dengan tetap menjaga batasan hidraulik (tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam batas yang diizinkan). Sehingga semakin kecil biayanya nilai *fitness*-nya semakin kecil dan sebaliknya. Fungsi *fitness* yang digunakan terdapat pada persamaan 3.1.

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

### 3.5.3.1. Menghitung Biaya yang Dibutuhkan untuk Pipa

#### 1. Kromosom 1 (A C B D)

$$C_{total}^1 = C_j(A) * 500 + C_j(C) * 700 + C_j(B) * 400 + C_j(D) * 600$$

$$C_{total}^1 = 500 \times 500 + 900 \times 700 + 700 \times 400 + 1100 \times 600$$

$$C_{total}^1 = 250.000 + 630.000 + 280.000 + 660.000$$

$$C_{total}^1 = 1.820.000$$

#### 2. Kromosom 2 (B B A C)

$$C_{total}^2 = C_j(B) * 500 + C_j(B) * 700 + C_j(A) * 400 + C_j(C) * 600$$

$$C_{total}^2 = 700 \times 500 + 700 \times 700 + 500 \times 400 + 900 \times 600$$

$$C_{total}^2 = 350.000 + 490.000 + 200.000 + 540.000$$

$$C_{total}^2 = 1.580.000$$

#### 3. Kromosom 3 (C A D B)

$$C_{total}^3 = C_j(A) * 500 + C_j(A) * 700 + C_j(D) * 400 + C_j(B) * 600$$

$$C_{total}^3 = 900 \times 500 + 500 \times 700 + 1100 \times 400 + 700 \times 600$$

$$C_{total}^3 = 450.000 + 350.000 + 440.000 + 420.000$$

$$C_{total}^3 = 1.660.000$$

### 3.5.3.2. Menghitung Aliran Air

Penghitungan aliran air dalam jaringan distribusi dilakukan berdasarkan prinsip konservasi massa yang dikenal sebagai kendala kontinuitas aliran. Prinsip ini menyatakan bahwa jumlah aliran yang masuk ke suatu simpul (*node*) harus sama dengan jumlah aliran yang keluar dari simpul tersebut, ditambah atau dikurangi dengan besar kebutuhan air (*demand*) di simpul tersebut. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 3.4.

Total *demand* =  $d_2 + d_5 = 10 + 12 = 22 \text{ L/s} = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ . Jadi, *node* 1 sebagai sumber:  $d_1 = -0.022 \text{ m}^3/\text{s}$

Kontinuitas dalam setiap *node*:

#### 1. *Node* 1

Semua air harus melewati *node* ini, *reservoir* ke *node* 2:

*Out* : ke *node* 2 ( $Q_{1,2}$ )

*In* : tidak ada

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

$$0 - Q_{1,2} = d_1 = -0.022$$

$$Q_{1,2} = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. *Node 2*

*In* : dari *node 1* ( $Q_{1,2}$ )

*Out* : ke *node 3* ( $Q_{2,3}$ ) dan ke *node 4* ( $Q_{2,4}$ )

$$Q_{1,2} - (Q_{2,3} + Q_{2,4}) = d_2 = 0$$

$$0.22 - (Q_{2,3} + Q_{2,4}) = 0$$

$$Q_{2,3} + Q_{2,4} = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. *Node 3*

*Node 3* memiliki *demand*, yaitu  $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$

*In* : dari *node 2* ( $Q_{2,3}$ )

*Out* : tidak ada

$$Q_{2,3} - 0 = d_3 = 0.10$$

$$Q_{2,3} = 0.010 \text{ m}^3/\text{s}$$

4. *Node 4*

*In* : dari *node 2* ( $Q_{2,4}$ )

*Out* : ke *node 5* ( $Q_{4,5}$ )

$$Q_{2,4} - Q_{4,5} = d_4 = 0$$

$$Q_{2,4} = Q_{4,5}$$

5. *Node 5*

*Node 5* memiliki *demand*, yaitu  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$

*In* : dari *node 2* ( $Q_{4,5}$ )

*Out* : tidak ada

$$Q_{4,5} - 0 = d_5 = 0.012$$

$$Q_{4,5} = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$$

Maka aliran air di setiap pipa diringkaskan dalam Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Data Aliran pada setiap Pipa

Pipa	Aliran Pipa ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Pipa 1	0.022
Pipa 2	0.01

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )
Pipa 3	0.012
Pipa 4	0.012

### 3.5.3.3. Menghitung Kecepatan Aliran dalam Pipa

Langkah selanjutnya adalah memastikan kecepatan aliran pada setiap pipa berada dalam batas yang diizinkan dan dihitung menggunakan Persamaan 3.8 dan 3.9 dengan  $V_{min,j} = 0.3 m/s$  dan  $V_{max,j} = 3.0 m/s$

Kecepatan aliran di setiap kromosom adalah sebagai berikut:

#### 1. Kromosom 1 (A C B D)

Kecepatan aliran pada masing-masing pipa untuk Kromosom 1 dihitung dan ditampilkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Kecepatan Aliran Pipa pada Kromosom 1

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter ( $m$ )	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Keterangan
Pipa 1	0.022	0.15	1.24	Memenuhi
Pipa 2	0.01	0.25	0.20	Tidak Memenuhi
Pipa 3	0.012	0.2	0.38	Memenuhi
Pipa 4	0.012	0.3	0.17	Tidak Memenuhi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dua pipa (Pipa 1 dan Pipa 3) memenuhi batas minimum kecepatan, sementara dua pipa lainnya tidak. Semua pipa tidak melebihi kecepatan maksimum, sehingga tidak ada pelanggaran batas atas. Penalti diberikan hanya untuk pelanggaran kecepatan minimum, dan nilai total penalti dihitung berdasarkan jumlah dan besar pelanggaran tersebut. Tabel 3.7 merangkum hasil perhitungan penalti pada Kromosom 1.

Tabel 3.7 Penalti untuk Kecepatan Aliran pada Kromosom 1

Pipa	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 1	1.24	Tidak	0
Pipa 2	0.20	Ya	0.1

Pipa	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 3	0.38	Tidak	0
Pipa 4	0.17	Ya	0.13

Total penalti dihitung berdasarkan Persamaan 3.1:

Substitusi nilai:

$$\lambda_2(0) + \lambda_3(0.1 + 0.13)$$

$$\lambda_3(0.23)$$

Jika misalnya  $\lambda_3 = 10.000.000$ , maka total penalti =  $10.000.000 \times 0.23 = 2.300.000$

## 2. Kromosom 2 (B B A C)

Kecepatan aliran pada masing-masing pipa untuk Kromosom 2 dihitung dan ditampilkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Kecepatan Aliran Pipa pada Kromosom 2

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter ( $m$ )	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Keterangan
Pipa 1	0.022	0.2	1.07	Memenuhi
Pipa 2	0.01	0.2	0.32	Memenuhi
Pipa 3	0.012	0.15	0.68	Memenuhi
Pipa 4	0.012	0.25	0.24	Tidak Memenuhi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tiga pipa (Pipa 1, Pipa 2, dan Pipa 3) memenuhi batas minimum kecepatan, sementara satu pipa tidak. Semua pipa tidak melebihi kecepatan maksimum, sehingga tidak ada pelanggaran terhadap batas atas. Penalti diberikan hanya untuk pelanggaran kecepatan minimum, dan nilai total penalti dihitung berdasarkan jumlah dan besar pelanggaran tersebut. Tabel 3.9 merangkum hasil perhitungan penalti pada Kromosom 2.

Tabel 3.9 Penalti untuk Kecepatan Aliran pada Kromosom 2

Pipa	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 1	1.07	Tidak	0

Pipa	Kecepatan Pipa (m/s)	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 2	0.32	Tidak	0
Pipa 3	0.68	Tidak	0
Pipa 4	0.24	Ya	0.06

Substitusi nilai:

$$\lambda_2(0) + \lambda_3(0.06)$$

$$\lambda_3(0.06)$$

Maka, total penalti =  $10.000.000 \times 0.06 = 600.000$

### 3. Kromosom 3 (C A D B)

Kecepatan aliran pada masing-masing pipa untuk Kromosom 3 dihitung dan ditampilkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Kecepatan Aliran Pipa pada Kromosom 3

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Kecepatan Pipa (m/s)	Keterangan
Pipa 1	0.022	0.25	0.45	Memenuhi
Pipa 2	0.01	0.15	0.57	Memenuhi
Pipa 3	0.012	0.3	0.17	Tidak Memenuhi
Pipa 4	0.012	0.2	0.38	Memenuhi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tiga pipa (Pipa 1, Pipa 2, dan Pipa 4) memenuhi batas minimum kecepatan, sementara satu pipa tidak. Semua pipa tidak melebihi kecepatan maksimum, sehingga tidak ada pelanggaran terhadap batas atas. Penalti diberikan hanya untuk pelanggaran kecepatan minimum, dan nilai total penalti dihitung berdasarkan jumlah dan besar pelanggaran tersebut. Tabel 3.11 merangkum hasil perhitungan penalti pada Kromosom 3.

Tabel 3.11 Penalti untuk Kecepatan Aliran pada Kromosom 3

Pipa	Kecepatan Pipa (m/s)	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 1	0.45	Tidak	0
Pipa 2	0.57	Tidak	0

Pipa	Kecepatan Pipa (m/s)	Pelanggaran $V_{min}$ (0.6m/s)	Penalti $V_j - V_{min,j}$
Pipa 3	0.17	Ya	0.13
Pipa 4	0.38	Tidak	0

Substitusi nilai:

$$\lambda_2(0) + \lambda_3(0.13)$$

$$\lambda_3(0.13)$$

Maka, total penalti =  $10.000.000 \times 0.13 = 1.300.000$

#### 3.5.3.4. Menghitung Tekanan

Perhitungan tekanan pada setiap *node* mempertimbangkan kerugian tekanan atau *head loss* akibat gesekan aliran air dalam pipa. Kerugian tekanan ini dihitung menggunakan persamaan Hazen-Williams dan persamaan yang digunakan adalah Persamaan 3.5, 3.6, dan 3.7. Semakin kecil diameter pipa, maka kehilangan tekanan akan semakin besar. Batasan yang digunakan dalam distribusi air minum adalah tekanan minimum 15 m, sedangkan tekanan maksimum umumnya dibatasi hingga 70 m untuk mencegah kerusakan pipa. Koefisien Hazen-Williams untuk pipa HDPE adalah 130 sehingga  $C=130$ .

Tekanan di setiap kromosom adalah sebagai berikut:

##### 1. Kromosom 1 (A C B D):

Tekanan pada masing-masing *node* dihitung berdasarkan kehilangan tekanan di setiap pipa, dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Tekanan di Kromosom 1

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 1	1 → 2	500	0.022	0.15	5.68	50 – 5.68 = 44.32
Pipa 2	2 → 3	700	0.01	0.25	0.15	44.32 – 0.15 = 44.17

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 3	2 → 4	400	0.012	0.2	0.36	44.32 – 0.36 = 43.96
Pipa 4	4 → 5	600	0.012	0.3	0.08	43.96 – 0.08 = 43.88

Berikut adalah contoh perhitungan manual pengerjaan tekanan:

Pipa 1 (A = 150 mm = 0.15 m, 500 m, 0.022  $m^3/s$ )

$$h_f = 10,67 \times 130^{-1,852} \times 0,022^{1,852} \times 150^{-4,87} \times 500 = 5.68$$

Karena tekanan di semua *node* masih berada di atas tekanan minimum 20 m, tidak ada penalti akibat pelanggaran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tekanan dalam jaringan pipa pada Kromosom 1 valid dan memenuhi kriteria kelayakan sistem distribusi air.

## 2. Kromosom 2 (B B A C):

Tekanan pada masing-masing *node* dihitung berdasarkan kehilangan tekanan di setiap pipa, dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Tekanan di Kromosom 2

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 1	1 → 2	500	0.022	0.2	1.4	50 – 1.4 = 48.6
Pipa 2	2 → 3	700	0.01	0.2	0.46	48.6 – 0.46 = 48.14
Pipa 3	2 → 4	400	0.012	0.15	1.48	48.6 – 1.48 = 47.12
Pipa 4	4 → 5	600	0.012	0.25	0.18	47.12 – 0.18 = 46.94

Karena tekanan di semua *node* masih berada di atas tekanan minimum 20 m, tidak ada penalti akibat pelanggaran. Dengan demikian, dapat

disimpulkan bahwa tekanan dalam jaringan pipa pada Kromosom 2 valid dan memenuhi kriteria kelayakan sistem distribusi air.

### 3. Kromosom 3 (C A D B):

Tekanan pada masing-masing *node* dihitung berdasarkan kehilangan tekanan di setiap pipa, dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Tekanan di Kromosom 3

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 1	1 → 2	500	0.022	0.25	0.47	50 – 0.47 = 49.53
Pipa 2	2 → 3	700	0.01	0.15	1.85	49.53 – 1.85 = 47.68
Pipa 3	2 → 4	400	0.012	0.3	0.05	49.53 – 0.05 = 49.48
Pipa 4	4 → 5	600	0.012	0.2	0.01	49.48 – 0.01 = 49.47

Karena tekanan di semua *node* masih berada di atas tekanan minimum 20 m, tidak ada penalti akibat pelanggaran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tekanan dalam jaringan pipa pada Kromosom 3 valid dan memenuhi kriteria kelayakan sistem distribusi air.

Kemudian substitusi biaya yang dibutuhkan untuk pipa, penalti kecepatan, dan tekanan yang diperoleh ke Persamaan 3.1.

Perhitungan nilai *fitness*:

#### 1. Kromosom 1 (A C B D)

$$F(X)^1 = C_{total}^1 + \lambda_1^1 + (\lambda_2 + \lambda_3)^1$$

$$F(X)^1 = 1.820.000 + 0 + 2.300.000$$

$$F(X)^1 = 4.120.000$$

## 2. Kromosom 2 (B B A C)

$$F(X)^2 = C_{total}^2 + \lambda_1^2 + (\lambda_2 + \lambda_3)^2$$

$$F(X)^2 = 1.580.000 + 0 + 600.000$$

$$F(X)^2 = 2.180.000$$

## 3. Kromosom 3 (C A D B)

$$F(X)^3 = C_{total}^3 + \lambda_1^3 + (\lambda_2 + \lambda_3)^3$$

$$F(X)^3 = 1.660.000 + 0 + 1.300.000$$

$$F(X)^2 = 2.960.000$$

### 3.5.4 Seleksi

Langkah selanjutnya melakukan proses seleksi dengan menggunakan metode *ranking* untuk untuk menentukan kromosom yang akan dipertahankan ke generasi berikutnya berdasarkan nilai fungsi objektifnya. Setiap kromosom dalam populasi diberikan probabilitas pemilihan yang berada dalam rentang antara probabilitas maksimum  $p_{max}$  dan probabilitas minimum  $p_{min}$ . Kromosom dalam populasi awal dengan nilai *fitness* ditunjukkan dalam Tabel 3.15.

Tabel 3.15 *Ranking* Kromosom Berdasarkan *Fitness*

Kromosom	<i>Fitness</i>	<i>Ranking</i>
Kromosom 1 (A C B D)	4.120.000	3
Kromosom 2 (B B A C)	2.180.000	1
Kromosom 3 (C A D B)	2.960.000	2

Probabilitas seleksi dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13. Untuk masing-masing kromosom diperoleh:

1. Kromosom 2 (*Ranking* 1):

$$p_1 = 0.067 + \left(\frac{1-1}{3-1}\right) \times (0.6 - 0.0667) = 0.067 + (0) \times 0.53 = 0.067$$

2. Kromosom 3 (*Ranking* 2):

$$p_2 = 0.0667 + \left(\frac{2-1}{3-1}\right) \times (0.6 - 0.0667) = 0.067 + (0.5) \times 0.53 = 0.3$$

3. Kromosom 1 (*Ranking* 3)

$$p_3 = 0.0667 + \left(\frac{3-1}{3-1}\right) \times (0.6 - 0.0667) = 0.067 + (1) \times 0.53 = 0.6$$

Hasil probabilitas seleksi ditunjukkan pada Tabel 3.16.

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Tabel 3.16 *Ranking* Kromosom Berdasarkan Probabilitas Seleksi

<b>Kromosom</b>	<b>Ranking</b>	<b>Probabilitas Seleksi</b>
Kromosom 1 (A C B D)	3	0.6
Kromosom 2 (B B A C)	1	0.067
Kromosom 3 (C A D B)	2	0.3

Dari hasil perhitungan probabilitas, akan dipilih 2 kromosom dari populasi awal yang akan masuk ke tahap *crossover*. Berdasarkan data pada Tabel 3.19 kromosom yang lolos seleksi dan masuk ke proses *crossover* adalah Kromosom 2 dan Kromosom 3.

### 3.5.5 *Crossover*

Pasangan kromosom yang telah lolos proses seleksi kemudian dipilih secara acak sebelum dilakukan proses *crossover*. *Crossover* adalah proses persilangan dua kromosom untuk membentuk kromosom baru yang lebih baik dari pada induk. Proses *crossover* dilakukan dengan menggunakan metode *single point crossover*. *Crossover* memiliki parameter probabilitas *crossover* ( $P_c$ ), dengan nilai  $P_c$  antara 0 sampai 1. Kemudian pilih sebuah bilangan acak antara 0 sampai 1. Jika bilangan acak yang dipilih kurang dari  $P_c$  maka dilakukan *crossover*. Jika bilangan acak yang dipilih lebih dari  $P_c$  maka tidak terjadi *crossover*. Langkah-langkah *single point crossover* adalah sebagai berikut:

1. Pilih dua kromosom dari populasi secara acak.
2. Tentukan titik *crossover* dengan cara memilih satu posisi diantara gen-gen kromosom yang akan dilakukan *crossover*.
3. Gen-gen yang berada di luar titik *crossover* ditukar antara dua kromosom induk membentuk dua anak.
4. Setelah proses *crossover*, hasilnya terdapat dua anak baru yang kemudian menjadi bagian dari populasi berikutnya.

Pada contoh kasus ini, diperoleh 2 kromosom yang akan melakukan *crossover* diantaranya Kromosom 2 dan Kromosom 3.  $P_c$  yang digunakan adalah 0,7 dan misalkan bilangan acak yang dipilih untuk pasangan Kromosom 2 dengan

Kromosom 3 adalah 0,65, akibatnya dilakukan *crossover* dengan metode *single point crossover* adalah sebagai berikut:

1. Induk yang terpilih  
 Kromosom 2 = B B A C  
 Kromosom 3 = C A D B
2. Menentukan titik *crossover* pada induk, misal dipilih titik *crossover* pada posisi kedua.  
 Sebelum *crossover*:  
 Kromosom 2 = B B | A C  
 Kromosom 3 = C A | D B  
 Setelah *crossover*:  
 Anak 1 = B B | D B  
 Anak 2 = C A | A C
3. Kromosom baru atau kromosom anak hasil *crossover* antara Kromosom 2 dan Kromosom 3 adalah  
 Anak 1 = **B B D B**  
 Anak 2 = **C A A C**  
 Kromosom baru tersebut akan menjadi kromosom yang baru untuk generasi berikutnya dalam PGA.

### 3.5.6 Mutasi

Proses mutasi diterapkan pada populasi yang diperoleh setelah proses *crossover*. Setelah ditetapkan, frekuensi mutasi untuk setiap gen dari setiap kromosom diperiksa ketika sebuah individu dibuat dari induknya. Jika huruf yang dihasilkan secara acak berada di bawah probabilitas tersebut, gen akan berubah. Kegunaan dari proses ini diwujudkan dalam perluasan area pencarian dalam ruang solusi yang layak.

Tingkat mutasi yang dipertimbangkan untuk mutasi dalam PGA berada di antara 1 dan 10%. Pada kasus ini akan diambil tingkat mutasi sebesar 4%, berarti setiap gen dalam setiap kromosom memiliki peluang 4% untuk bermutasi. Misalkan ada 3 kromosom dengan 4 gen per kromosom, maka total gen dalam populasi:

$$3 \times 4 = 12 \text{ gen}$$

Dengan probabilitas mutasi 4%, maka setiap gen memiliki peluang 4% untuk bermutasi secara individual.

Langkah-langkah mutasi:

1. Buat angka acak antara 0 hingga 1 untuk setiap gen.
2. Jika angka acak  $\leq 0.04$  (4%), maka gen tersebut bermutasi.
3. Gunakan *Gray Code* untuk mutasi (misalnya, jika gen berbentuk  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , maka mutasi hanya boleh berpindah ke gen terdekat, bukan lompat jauh).

Karena jumlah kromosom yang akan di mutasi adalah 2 dan setiap kromosom memiliki 4 gen sehingga total gen dalam populasi adalah 8 gen. Pada Tabel 3.17 dimisalkan probabilitas pada setiap pipa (gen).

Tabel 3.17 Probabilitas Mutasi Pipa pada Anak 1 dan 2

Gen	Probabilitas	Mutasi	Gen	Probabilitas	Mutasi
B	0.12 ( $> 0.04$ )	Tidak Mutasi	C	0.07 ( $> 0.04$ )	Tidak Mutasi
B	0.20 ( $> 0.04$ )	Tidak Mutasi	A	0.10 ( $> 0.04$ )	Tidak Mutasi
D	0.03 ( $< 0.04$ )	Mutasi	A	0.15 ( $> 0.04$ )	Tidak Mutasi
B	0.20 ( $< 0.04$ )	Tidak Mutasi	C	0.01 ( $< 0.04$ )	Mutasi

Dari Tabel 3.20, gen yang akan mengalami mutasi adalah:

- Anak 1, gen ke-2 (D)  $\rightarrow$  Mutasi
- Anak 2, gen ke-3 (C)  $\rightarrow$  Mutasi

Mutasi dengan *Gray Code* berarti perubahan harus terjadi ke nilai yang paling dekat dalam urutan alfanumerik.

1. Anak 1 (**B B D B**)
  - a. Gen ke-2 mengalami mutasi (D  $\rightarrow$  C)
  - b. Pilihan *Gray Code* terdekat dari D:
    - Bisa menjadi C (sebelumnya)
  - c. Anak 1 setelah mutasi: B B C B
2. Anak 2 (**C A A C**)
  - a. Gen ke-3 mengalami mutasi (C  $\rightarrow$  B atau D)
  - b. Pilihan *Gray Code* terdekat dari C:
    - Bisa menjadi B (sebelumnya)

Anisa Nur Aidah, 2025

OPTIMISASI DIAMETER PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM DENGAN BANTUAN EPANET (STUDI KASUS: PDAM TIRTA RAHARJA SADU KABUPATEN BANDUNG)

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

- Bisa menjadi D (setelahnya)
- c. Misalkan setelah diacak lagi untuk menentukan perubahan, dan hasilnya adalah B.
  - d. Anak 2 setelah mutasi: C A A B

Tabel 3.18 Hasil Kromosom Setelah Mutasi

Kromosom	Sebelum Mutasi	Setelah Mutasi
Anak 1	B B D B	B B C B
Anak 2	C A A C	C A A B

### 3.5.7 Evaluasi Ulang

Seleksi kembali dilakukan untuk memilih kromosom terbaik dari generasi baru untuk memastikan generasi berikutnya memiliki kualitas yang lebih baik. Kondisi berhenti terpenuhi saat generasi sudah mencapai jumlah maksimum yang telah ditentukan serta jika tidak ada perubahan signifikan dalam nilai *fitness* terbaik dalam populasi selama sejumlah generasi berturut-turut.

#### 1. Menghitung Biaya yang Dibutuhkan untuk Pipa

##### a. Anak 1 (B B C B)

$$C_{total}^4 = C_j(B) * 500 + C_j(B) * 700 + C_j(C) * 400 + C_j(B) * 600$$

$$C_{total}^4 = 700 \times 500 + 700 \times 700 + 900 \times 400 + 700 \times 600$$

$$C_{total}^4 = 350.000 + 490.000 + 360.000 + 420.000$$

$$C_{total}^4 = 1.620.000$$

##### b. Anak 2 (C A A B)

$$C_{total}^5 = C_j(C) * 500 + C_j(A) * 700 + C_j(A) * 400 + C_j(B) * 600$$

$$C_{total}^5 = 900 \times 500 + 500 \times 700 + 500 \times 400 + 700 \times 600$$

$$C_{total}^5 = 450.000 + 350.000 + 200.000 + 420.000$$

$$C_{total}^5 = 1.420.000$$

#### 2. Menghitung Kecepatan Aliran dalam Pipa

##### a. Anak 1 (B B C B)

Kecepatan aliran pada masing-masing pipa untuk Anak 1 dihitung dan ditampilkan pada Tabel 3.19.

Tabel 3.19 Kecepatan Aliran pada Anak 1

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter ( $m$ )	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Keterangan
Pipa 1	0.022	0.20	0.7	Memenuhi
Pipa 2	0.01	0.2	0.32	Memenuhi
Pipa 3	0.012	0.25	0.24	Tidak Memenuhi
Pipa 4	0.012	0.2	0.38	Memenuhi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tiga pipa (Pipa 1, Pipa 2, dan Pipa 4) memenuhi batas minimum kecepatan, sementara satu pipa tidak. Semua pipa tidak melebihi kecepatan maksimum, sehingga tidak ada pelanggaran terhadap batas atas. Penalti diberikan hanya untuk pelanggaran kecepatan minimum, dan nilai total penalti dihitung berdasarkan jumlah dan besar pelanggaran tersebut. Tabel 3.20 merangkum hasil perhitungan penalti pada Anak 1.

Tabel 3.20 Penalti pada Anak 1.

Pipa	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_{min,j} - V_j$
Pipa 1	0.7	Tidak	0
Pipa 2	0.32	Tidak	0
Pipa 3	0.24	Ya	0.06
Pipa 4	0.38	Tidak	0

Substitusi nilai:

$$\lambda_2(0) + \lambda_3(0.06)$$

$$\lambda_3(0.06)$$

Maka, total penalti =  $10.000.000 \times 0.06 = 600.000$

b. Anak 2 (C A A B)

Kecepatan aliran pada masing-masing pipa untuk Anak 2 dihitung dan ditampilkan pada Tabel 3.21.

Tabel 3.21 Kecepatan Aliran pada Anak 2.

Pipa	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter ( $m$ )	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Keterangan
Pipa 1	0.022	0.25	0.45	Memenuhi
Pipa 2	0.01	0.15	0.57	Memenuhi
Pipa 3	0.012	0.15	0.68	Memenuhi
Pipa 4	0.012	0.2	0.38	Memenuhi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh pipa memenuhi batas minimum kecepatan dan tidak ada pipa yang melebihi kecepatan maksimum, sehingga tidak ada pelanggaran terhadap batas atas kecepatan. Penalti hanya diberikan untuk pelanggaran kecepatan minimum, dan total penalti dihitung berdasarkan jumlah dan besar pelanggaran tersebut. Tabel 3.22 merangkum hasil perhitungan penalti pada Anak 2. Karena tidak ada pelanggaran, maka tidak ada penalti pada kromosom Anak 2 ini.

Tabel 3.22 Penalti Kecepatan Aliran pada Anak 2.

Pipa	Kecepatan Pipa ( $m/s$ )	Pelanggaran $V_{min}(0.6m/s)$	Penalti $V_{min,j} - V_j$
Pipa 1	0.45	Tidak	0
Pipa 2	0.57	Tidak	0
Pipa 3	0.68	Tidak	0
Pipa 4	0.38	Tidak	0

3. Menghitung Tekanan
  - a. Anak 1 (**B B C B**):

Tekanan pada masing-masing *node* dihitung berdasarkan kehilangan tekanan di setiap pipa, dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.23.

Tabel 3.23 Tekanan pada Anak 1

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 1	1 → 2	500	0.022	0.2	1.4	$50 - 1.4 = 48.6$
Pipa 2	2 → 3	700	0.01	0.2	0.46	$48.6 - 0.46 = 48.04$
Pipa 3	2 → 4	400	0.012	0.25	0.12	$48.6 - 0.12 = 48.48$
Pipa 4	4 → 5	600	0.012	0.2	0.55	$48.48 - 0.55 = 47.93$

Karena tekanan di semua *node* masih berada di atas tekanan minimum 20 m, tidak ada penalti akibat pelanggaran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tekanan dalam jaringan pipa pada Anak 1 valid dan memenuhi kriteria kelayakan sistem distribusi air.

b. Anak 2 (C A A B):

Tekanan pada masing-masing *node* dihitung berdasarkan kehilangan tekanan di setiap pipa, dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.24.

Tabel 3.24 Tekanan pada Anak 2

Pipa	Node	Panjang (m)	Aliran Pipa ( $m^3/s$ )	Diameter (m)	Head loss (m)	Tekanan (m)
Pipa 1	1 → 2	500	0.022	0.25	0.47	$50 - 0.47 = 49.53$
Pipa 2	2 → 3	700	0.01	0.15	1.85	$49.53 - 1.85 = 47.68$
Pipa 3	2 → 4	400	0.012	0.15	1.48	$49.53 - 1.48 = 48.05$
Pipa 4	4 → 5	600	0.012	0.2	0.55	$48.05 - 0.55 = 47.50$

Karena tekanan di semua *node* masih berada di atas tekanan minimum 20 m, tidak ada penalti akibat pelanggaran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tekanan dalam jaringan pipa pada Anak 2 valid dan memenuhi kriteria kelayakan sistem distribusi air.

Kemudian substitusi biaya pemasangan pipa, penalti tekanan, dan kecepatan yang telah dihitung sebelumnya ke Persamaan 3.1.

Perhitungan nilai *fitness*:

a. Anak 1 (**B B C B**):

$$F(X)^4 = C_{total}^4 + \lambda_1^4 + (\lambda_2 + \lambda_3)^4$$

$$F(X)^4 = 1.620.000 + 0 + 600.000$$

$$F(X)^4 = 2.220.000$$

b. Anak 2 (**C A A B**)

$$F(X)^5 = C_{total}^5 + \lambda_1^5 + (\lambda_2 + \lambda_3)^5$$

$$F(X)^5 = 1.420.000 + 0 + 0$$

$$F(X)^5 = 1.420.000$$

Masing-masing kromosom baru dihitung nilai *fitness* seperti pada tahap sebelumnya, sehingga diperoleh nilai *fitness* pada kromosom baru yang terdapat pada Tabel 3.25.

Tabel 3.25 Nilai *Fitness* dari Kromosom Baru

<b>Kromosom</b>	<b>Nilai <i>Fitness</i></b>
Kromosom 2 (B B A C)	2.180.000
Kromosom 3 (C A B D)	2.960.000
Anak 1 (B B C B)	2.220.000
Anak 2 (C A A B)	1.420.000

Pada contoh kasus di atas, solusi terbaik yang diperoleh adalah Anak 2, yaitu C A A B. Dengan kata lain diameter optimal untuk pipa 1 adalah 250 mm, untuk pipa 2 adalah 150 mm, pipa 3 adalah 150 mm, dan pipa 4 adalah 200 mm dengan nilai *fitness* atau total biaya jaringan distribusi adalah Rp 1.420.000,00. Pada

Gambar 3.4 menunjukkan hasil perhitungan EPANET saat dimasukan diameter pipa optimal pada contoh kasus.

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s
Pipe 1	500	250	130	22.00	0.45
Pipe 2	700	150	130	10.00	0.57
Pipe 3	400	150	130	12.00	0.68
Pipe 4	600	200	130	12.00	0.38

Node ID	Demand LPS	Pressure m
Junc 2	0.00	49.53
Junc 3	10.00	47.68
Junc 4	0.00	48.04
Junc 5	12.00	47.50
Resvr 1	-22.00	0.00

Gambar 3.4 Hasil Perhitungan EPANET untuk Diameter pada Contoh Kasus