

## PENENTUAN DIAMETER OPTIMAL PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MENGUNAKAN PSEUDO-GENETIC ALGORITHM

**Anisa Nur Aidah**

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia  
e-mail: [anisanuraidah@upi.edu](mailto:anisanuraidah@upi.edu)

**Kartika Yulianti\***

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia  
e-mail: [kartika.yulianti@upi.edu](mailto:kartika.yulianti@upi.edu)

**Encum Sumiaty**

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia  
e-mail: [esumiaty@upi.edu](mailto:esumiaty@upi.edu)

### Abstrak

Pada penelitian ini dibangun model matematika untuk menentukan diameter pipa secara optimal pada sebuah jaringan saluran distribusi air dengan tujuan meminimumkan biaya sekaligus menjaga kinerja hidraulik sistem. Optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan batasan teknis berupa tekanan minimum dan kecepatan aliran dalam pipa. Permasalahan optimasi dipandang sebagai kombinasi aspek teknis dan ekonomi, sehingga digunakan pendekatan *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA) yang dimodifikasi melalui representasi kromosom alfanumerik serta penerapan operator mutasi berbasis *Gray Code*. Studi kasus diterapkan pada jaringan distribusi PDAM Tirta Raharja Unit Sadu, dan simulasi hidraulik dilakukan menggunakan perangkat lunak EPANET 2.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma ini menghasilkan solusi dengan total biaya minimum sebesar Rp31.141.171.200,00. Seluruh pipa memenuhi batas tekanan minimum, meskipun beberapa segmen pipa memiliki kecepatan aliran di bawah standar. Temuan ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan efektif secara ekonomi dan layak secara teknis, meskipun masih terdapat ruang untuk peningkatan performa hidraulik.

**Kata Kunci:** Optimisasi jaringan pipa, *Pseudo-Genetic Algorithm*, *Gray Code*, EPANET 2.0, Efisiensi biaya

### Abstract

This study develops a mathematical model to determine the optimal pipe diameters in a water distribution network, with the dual objectives of minimizing total system cost and maintaining hydraulic performance. The optimization considers technical constraints, including minimum pressure requirements and acceptable flow velocity ranges within pipes. The problem is approached as a combination of technical and economic factors, and is addressed using a modified *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA) that incorporates an alphanumeric chromosome representation and *Gray Code*-based mutation operations. A case study was conducted on the distribution network of PDAM Tirta Raharja Unit Sadu, with hydraulic simulations performed using EPANET 2.0. The results show that the proposed algorithm achieved a minimum total cost of Rp31,141,171,200.00, with all pipes meeting the minimum pressure requirement, although some pipe segments exhibited flow velocities below the recommended standard. These findings suggest that the proposed method is economically efficient and technically viable, although further improvements could be made to enhance hydraulic performance.

**Keywords:** Pipe network optimization, *Pseudo-Genetic Algorithm*, *Gray Code*, EPANET 2.0, Cost efficiency

### PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya alam esensial yang berperan vital dalam mendukung keberlangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya. Ketersediaan serta pengelolaan air bersih yang efisien

menjadi faktor kunci untuk menjamin kesejahteraan masyarakat, terutama di tengah laju pertumbuhan penduduk dan proses urbanisasi yang semakin meningkat (Lasut dkk, 2023).

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) merupakan entitas milik pemerintah daerah yang

bertugas menyediakan layanan air bersih bagi masyarakat. PDAM memegang peran strategis dalam memenuhi kebutuhan air untuk keperluan domestik, sosial, dan ekonomi. Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, peningkatan kualitas hidup, dan ekspansi kawasan perkotaan, permintaan terhadap pasokan air bersih mengalami peningkatan yang signifikan (Lasut dkk, 2023).

Untuk mengatasi tantangan dalam penyediaan air bersih, PDAM mengelola Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) yang mencakup seluruh tahapan, mulai dari pengambilan air baku, proses pengolahan, hingga pendistribusian air ke pelanggan. SPAM dirancang agar dapat memenuhi standar pelayanan dalam hal kuantitas, kualitas, tekanan, dan kontinuitas aliran (Zamzami dkk., 2018). Salah satu elemen kunci dalam sistem ini adalah jaringan distribusi, terutama sistem perpipaan, yang bertugas menyalurkan air dari instalasi pengolahan ke konsumen. Efektivitas jaringan perpipaan sangat berpengaruh terhadap performa keseluruhan sistem distribusi (Saleh, 2017). Untuk memastikan penyediaan air bersih yang optimal, jaringan pipa harus mampu mengatasi berbagai kendala teknis seperti tekanan air, kecepatan aliran, dan efisiensi biaya. Dengan demikian, perancangan pipa yang tepat menjadi aspek krusial dalam menjamin keandalan serta keberlanjutan layanan distribusi air bersih.

Menurut (Saleh dkk., 2020), penentuan diameter pipa yang optimal merupakan salah satu tantangan utama dalam perancangan sistem jaringan perpipaan. Ukuran diameter pipa memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi aliran dan tekanan air, sekaligus berkontribusi langsung terhadap biaya instalasi maupun pemeliharaan. Meski demikian, hubungan antara diameter dan biaya tidak selalu bersifat linier peningkatan ukuran pipa tidak serta-merta menyebabkan kenaikan biaya dalam proporsi yang sama. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan yang cermat dalam menentukan diameter yang mampu meminimalkan total biaya jaringan tanpa mengabaikan aspek teknis seperti tekanan minimum dan kecepatan aliran. Desain jaringan pipa yang efektif harus dapat mempertahankan tekanan yang memadai di seluruh titik distribusi, mengurangi kehilangan energi, serta menjaga agar biaya tetap efisien (Saleh dkk., 2020).

Dalam implementasinya, jaringan perpipaan yang ideal harus mampu menjaga tekanan minimum secara konsisten di seluruh titik distribusi untuk meminimalkan kehilangan energi, sekaligus mempertahankan efisiensi biaya dalam batas yang wajar. Untuk mencapai hal tersebut, telah dikembangkan berbagai metode pemodelan matematis, mulai dari pendekatan pemrograman linier, non-linier, hingga pemodelan dinamis. Penelitian oleh Awe dkk., (2019) mengindikasikan bahwa pendekatan berbasis stokastik dan dinamis semakin sering digunakan dalam mengatasi kompleksitas perancangan jaringan pipa. Beberapa metode stokastik yang telah diterapkan antara lain *Simulated Annealing* (SA) untuk pencarian solusi global, *Shuffled Complex Evaluation* (SCE) dalam penyesuaian parameter, *Ant Colony Optimization Algorithm* (ACOAs) yang meniru perilaku koloni semut, *Shuffled Frog Leaping Algorithm* (SFLA) yang berlandaskan pada konsep evolusi kelompok, serta *Genetic Algorithm* (GA) dengan prinsip seleksi alam. Seiring berkembangnya teknologi optimasi, muncul tren penggunaan metode *hybrid* yang menggabungkan dua atau lebih algoritma untuk meningkatkan kinerja. Savic dan Walters (1997) berhasil mengombinasikan *Genetic Algorithm* dengan metode pencarian lokal, sedangkan Van Zyl dkk., (2004) mengintegrasikan GA dengan metode Fibonacci untuk meningkatkan presisi. Penelitian oleh Mala-Jetmarova dkk., (2018) memperkuat argumen bahwa pendekatan stokastik sangat cocok diterapkan pada sistem jaringan perpipaan berskala besar karena fleksibilitas dan kemampuannya dalam menangani kompleksitas tinggi.

Reca (dalam Mora-Melia dkk., 2013) menyatakan bahwa beberapa penelitian telah membandingkan performa berbagai algoritma seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Shuffled Frog Leaping Algorithm* (SFLA), dan *Memetic Algorithm*, dengan hasil yang menunjukkan bahwa tidak ada satu metode yang lebih unggul dari yang lainnya. Menurut Sulianto dkk., (2021), beberapa penelitian juga telah membandingkan kinerja berbagai teknik optimisasi. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Somaida (dalam Sulianto dkk., 2021), sebuah aplikasi bernama GANEO dikembangkan untuk mengoptimalkan diameter pipa. Aplikasi ini menggabungkan simulasi hidrolik berbasis EPANET dengan optimisasi diameter pipa menggunakan

*Genetic Algorithm* (GA). Afshar (dalam Sulianto dkk., 2021) mengusulkan kombinasi antara algoritma elemen per elemen untuk memecahkan persamaan hidrolis pipa dengan *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk optimisasi diameter pipa. Abebe dan Solomatine (dalam Sulianto dkk., 2021) mengusulkan integrasi metode optimisasi GLOBE dengan model simulasi hidrolis jaringan berbasis EPANET. Metode GLOBE, yang dikembangkan oleh Abebe dan Solomatine (1998), digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi dengan tujuan meminimalkan biaya. Metode ini mencakup empat teknik, yaitu: *Controlled Random Search* (CRS2), CRS4, GA, dan *Adaptive Cluster Covering with Local Search* (ACCOL). Hasil penelitian menunjukkan bahwa GA dan ACCOL terbukti efisien dan efektif.

*Genetic Algorithm* (GA) merupakan metode pencarian solusi yang didasarkan pada prinsip evolusi buatan, yang pertama kali diperkenalkan oleh Holland pada tahun 1975 (Goldberg, 1989). Algoritma ini beroperasi dengan meniru mekanisme genetika dalam suatu populasi dan prinsip seleksi alam untuk memperoleh solusi yang lebih adaptif. Seiring dengan perkembangannya, GA telah mengalami berbagai modifikasi guna meningkatkan efektivitasnya dalam berbagai aplikasi. Keunggulan utama GA terletak pada kemampuannya untuk menemukan solusi dengan efisien, menjadikannya metode yang tangguh (*robust*) dan fleksibel untuk diterapkan pada berbagai formulasi dan skenario optimisasi (Goldberg, 1989).

Pada *Genetic Algorithm* (GA), pemilihan acak gen yang mengalami persilangan dapat menghasilkan fraksi kode biner yang menggambarkan variabel keputusan yang mungkin. Fenomena ini, yang dikenal sebagai bias posisi, dapat mengurangi kualitas solusi yang ditemukan (Mora-Melia dkk., 2013). Untuk mengatasi keterbatasan ini, salah satu metode alternatif yang dapat diterapkan dalam optimisasi jaringan pipa air Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) adalah *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA). Dalam penelitian ini, PGA diterapkan sebagai modifikasi dari GA. Berbeda dengan GA, PGA menggunakan strategi induk komplementer dalam proses inisialisasi individu, yang memungkinkan peningkatan keragaman populasi dan kemampuan pencarian solusi yang lebih baik. Selain itu, PGA menghilangkan kebutuhan akan pencegahan inses, strategi seleksi, dan mutasi, yang akhirnya

menyederhanakan proses komputasi serta mempercepat pencarian solusi optimal secara elit (Chen dkk., 2010). Dengan kata lain, PGA dirancang untuk mengatasi keterbatasan yang ada pada GA dan mempercepat konvergensi menuju solusi terbaik.

Hingga saat ini, masih terbatas penelitian yang secara khusus menggunakan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA) dalam optimisasi jaringan pipa distribusi SPAM. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA) dalam menentukan diameter optimal jaringan pipa distribusi di PDAM Tirta Raharja Sadu, Kabupaten Bandung. Fokus utama penelitian ini adalah untuk meminimalkan biaya total jaringan dengan memperhatikan nilai tekanan dan kecepatan air di dalam pipa. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mendukung perencanaan infrastruktur air bersih berbasis efisiensi biaya dan kinerja teknis yang andal.

## KAJIAN TEORI

### GRAF

Menurut (Munir, 2010), graf  $G$  didefinisikan sebagai pasangan himpunan  $(V, E)$ , yang ditulis dengan notasi  $G = (V, E)$ . Dalam definisi ini,  $V$  merepresentasikan himpunan simpul (*vertex* atau *node*) yang tidak kosong dan digambarkan sebagai titik-titik, sedangkan  $E$  adalah himpunan sisi (*edges* atau *arcs*) yang menghubungkan antar sepasang simpul dalam graf. Oleh karena itu, graf dapat diartikan sebagai sekumpulan titik yang saling terhubung melalui garis.

### JARINGAN

Menurut Johnsonbaugh (dalam Khairani dan Sirait, 2013), jaringan dapat didefinisikan sebagai graf berarah berbobot sederhana yang memenuhi tiga karakteristik utama. Pertama, simpul yang berfungsi sebagai sumber (*source*) tidak memiliki sisi masuk (*incoming edges*). Kedua, simpul yang berperan sebagai tujuan (*sink*) tidak memiliki sisi keluar (*outgoing edges*). Ketiga, setiap sisi berarah dari simpul  $i$  ke simpul  $j$  memiliki bobot bernilai non-negatif, yang dikenal sebagai kapasitas aliran (*capacity*) dari sisi tersebut dan dilambangkan dengan  $C_{ij}$ .

## ALGORITMA PSEUDO-GENETIKA

Algoritma Pseudo-Genetika (PGA) adalah bentuk penyempurnaan dari Algoritma Genetika (GA). Goldberg (1989) menggambarkan GA sebagai metode pencarian berbasis mekanisme genetika, yang meniru prinsip seleksi alam dan evolusi dalam mempertahankan individu terbaik (Mora-Melia dkk., 2013). GA sendiri dikenal sebagai algoritma metaheuristik yang meniru proses biologis dengan menerapkan prinsip "*survival of the fittest*" dalam tahapan seleksi, *crossover*, dan mutasi.

Dalam GA, pemilihan acak gen persilangan dapat menciptakan fraksi kode biner yang mengidentifikasi variabel keputusan yang mungkin. Fenomena ini dikenal sebagai bias posisi dan menurunkan kualitas solusi (Mora-Melia dkk., 2013). Sebagai respons terhadap permasalahan ini, PGA dikembangkan sebagai alternatif yang lebih unggul dalam optimisasi. Perbedaan utama PGA dengan GA klasik terletak pada cara representasi variabel keputusannya, yakni menggunakan kombinasi encoding alfanumerik dan biner, serta menerapkan Gray Code untuk mengurangi perubahan drastis dalam nilai variabel keputusan (Mora-Melia dkk., 2013). Selain itu, PGA lebih menekankan pada keragaman populasi dengan meningkatkan variasi operator genetika.

Dari segi implementasi, *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA) mengadopsi mekanisme genetika serupa dengan *Genetic Algorithm*, namun dengan parameter yang lebih fleksibel dan sederhana, seperti probabilitas mutasi, tingkat *crossover*, serta ukuran populasi yang dapat disesuaikan. PGA terdiri dari tiga tahap utama reproduksi, *crossover*, dan mutasi yang bekerja secara iteratif. Proses diawali dengan pembangkitan populasi awal secara acak, lalu setiap kromosom dievaluasi berdasarkan nilai *fitness*-nya. Dalam konteks optimisasi jaringan distribusi air, nilai *fitness* biasanya mengacu pada total biaya sistem, sehingga kromosom dengan biaya paling efisien akan lebih diutamakan dalam proses reproduksi dan perbaikan solusi (Mora-Melia dkk., 2013).

PGA banyak digunakan dalam optimisasi jaringan distribusi, termasuk dengan bantuan perangkat lunak EPANET untuk mensimulasikan konfigurasi jaringan pipa yang diusulkan. Kombinasi PGA dengan EPANET *toolkit* memungkinkan validasi solusi terhadap batasan-batasan yang telah

ditentukan dalam fungsi objektif, sehingga meningkatkan keandalan algoritma ini dalam praktik nyata (Mora-Melia dkk., 2013). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa dibandingkan dengan metode evolusi lainnya, PGA menawarkan efisiensi lebih tinggi dalam menangani masalah optimisasi yang kompleks, seperti perancangan sistem perpipaan dalam pengelolaan sumber daya air (Mora-Melia dkk., 2013).

### Tahapan Algoritma Pseudo-Genetika (PGA)

1. Membangkitkan Populasi Awal  
Sejumlah besar individu dibentuk secara acak berdasarkan kompleksitas masalah dan jenis operator genetika yang digunakan (Suprpto & Sariman, 2012). Setelah ukuran populasi ditentukan, populasi awal dibangkitkan.
2. Evaluasi *Fitness*  
Setiap individu dinilai menggunakan fungsi *fitness* untuk mengukur seberapa dekat solusi tersebut dengan solusi optimal. Individu dengan *fitness* lebih tinggi memiliki peluang lebih besar untuk bertahan dan terpilih Goldberg (1989).
3. Seleksi  
Berdasarkan prinsip "*survival of the fittest*," individu dengan nilai *fitness* terbaik dipilih untuk direkombinasi dan menghasilkan generasi baru yang lebih baik Goldberg (1989).
4. *Crossover*  
Dua individu terpilih (induk) dikombinasikan untuk menghasilkan keturunan (*offspring*) dengan sifat gabungan dari kedua induk tersebut. Proses ini meniru reproduksi seksual dalam biologi (Goldberg, 1989; Michalewicz, 1996).
5. Mutasi berbasis *Gray Code*  
Mutasi dilakukan dengan menggunakan representasi *Gray Code*, sehingga perubahan nilai gen hanya bergerak satu tingkat lebih tinggi atau lebih rendah. Ini menjaga stabilitas pencarian solusi, memperhalus eksplorasi ruang solusi, dan mencegah perubahan besar yang dapat merusak kualitas solusi yang sudah baik (Mora-Melia dkk., 2013).

## SISTEM JARINGAN PIPA

Sistem perpipaan merupakan suatu sistem yang dirancang untuk transportasi fluida antar peralatan (*equipment*) dari suatu tempat ke tempat yang lain sehingga dapat dilakukan proses produksi. Sistem ini menggunakan jaringan pipa untuk mendistribusikan air. Metode pelayanan meliputi sambungan rumah, sambungan halaman, dan sambungan umum. Terdapat beberapa sistem distribusi penyaluran air bersih melalui jaringan pipa, tergantung pada kondisi topografi, lokasi sumber air baku, dan perbedaan ketinggian daerah pengaliran atau daerah layanan (Dairi dan Sukarmin, 2022). Sistem perpipaan merupakan suatu sistem yang dirancang untuk transportasi fluida antar peralatan (*equipment*) dari suatu tempat ke tempat yang lain sehingga dapat dilakukan proses produksi. Sistem ini menggunakan jaringan pipa untuk mendistribusikan air. Metode pelayanan meliputi sambungan rumah, sambungan halaman, dan sambungan umum. Terdapat beberapa sistem distribusi penyaluran air bersih melalui jaringan pipa, tergantung pada kondisi topografi, lokasi sumber air baku, dan perbedaan ketinggian daerah pengaliran atau daerah layanan (Dairi dan Sukarmin, 2022).

## ALIRAN AIR

Dalam sistem jaringan distribusi air, pemahaman mengenai perilaku aliran sangat penting karena secara langsung memengaruhi efisiensi hidraulik dan tekanan pada titik pelayanan. Simulasi hidraulik seperti yang dilakukan melalui perangkat lunak EPANET dapat membantu dalam menganalisis pola aliran dan meminimalkan kerugian tekanan dengan mendesain konfigurasi pipa yang optimal (Rossman, 2000).

## TEKANAN

Tekanan dalam jaringan pipa distribusi air bersih merupakan elemen krusial dalam menjaga kelancaran dan keberlanjutan sistem penyediaan air. Penurunan tekanan bisa terjadi karena berbagai faktor, salah satunya adalah penggunaan air secara bersamaan, misalnya banyak keran dibuka dalam waktu yang sama, yang dapat menyebabkan aliran melemah dan meningkatkan risiko kebocoran. Studi oleh Rohiem dkk., (2021) menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada sistem pemantauan tekanan mampu memberikan

kontrol aliran air secara real-time, sehingga tekanan bisa dijaga tetap stabil.

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

$$H_j \geq H_{min,j}$$

dengan:

$H_j$  : tekanan di *node* akhir (tujuan) (m)

$H_{min,j}$  : tekanan minimum yang harus dipenuhi

Tekanan di *node* bergantung pada tekanan di *node* awal dikurangi kehilangan tekanan akibat gesekan dalam pipa (Wisittipanch & Buakum, 2019).

$$H_j = H_i - h_f$$

dengan:

$H_i$  : tekanan di *node* awal (m)

$h_f$  : kehilangan tekanan (m)

## HEAD LOSS

*Head loss* adalah penurunan tekanan pada fluida yang mengalir dalam pipa, yang terjadi akibat gesekan antara fluida yang mengalir dengan dinding pipa (*friction loss*), serta karena gangguan aliran seperti sambungan pipa, belokan, katup, dan perubahan penampang (*minor loss*) (Alkindi dkk., 2023). Salah satu metode yang umum digunakan untuk menghitung *head loss* adalah persamaan Hazen-Williams, yang dirumuskan sebagai berikut (Jamil dan Mujeebu, 2019):

$$h_f = \frac{10,67L}{C^{1,852} D^{4,87}} Q^{1,852}$$

dengan:

$h_f$  : kehilangan tekanan (m)

$L$  : panjang pipa (m)

$C$  : koefisien Hazen-williams

$D$  : diameter pipa yang dipilih untuk pipa

$Q$  : aliran dalam pipa ( $m^3/s$ )

## EPANET 2.0

EPANET 2.0 adalah perangkat lunak simulasi yang dikembangkan oleh *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) untuk memodelkan aliran hidraulik dan kualitas air dalam jaringan distribusi air bertekanan. EPANET mendukung perencanaan, evaluasi, dan manajemen sistem distribusi dengan fitur analisis seperti desain jaringan, kalibrasi hidrolis, analisis klorin residual, hingga evaluasi kualitas pelayanan pelanggan. Aplikasi ini memungkinkan simulasi alternatif

sumber air, strategi pemompaan, pengolahan air (seperti klorinasi), hingga pembersihan dan penggantian pipa. Berbasis Windows, EPANET menyediakan fasilitas *editing* data, menjalankan simulasi, serta menampilkan hasil berupa peta berwarna, tabel, grafik, dan kontur visual secara interaktif (Rossman, 2000).

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif dan analitis. Penelitian dimulai dengan identifikasi permasalahan efisiensi dalam jaringan distribusi air bersih, khususnya dalam pemilihan diameter pipa yang optimal agar sistem memenuhi kriteria teknis sekaligus meminimalkan biaya instalasi.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer berupa skema jaringan pipa dari PDAM Tirta Raharja Unit Sadu Kabupaten Bandung serta dokumentasi teknis yang tersedia. Data mencakup informasi tentang panjang segmen pipa, titik pelangan, serta titik *reservoir*.

Karena seluruh segmen pipa dalam jaringan (42 segmen pipa) dianalisis, maka tidak dilakukan teknik sampling. Seluruh data diolah menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel, Python, dan EPANET 2.0. EPANET digunakan untuk melakukan simulasi hidraulik guna memverifikasi tekanan dan kecepatan aliran hasil dari proses optimisasi.

Dalam penyelesaian masalah dengan PGA, dibuat pengkodean data pipa ke dalam bentuk kromosom alfanumerik (misal: A, B, C untuk mewakili diameter tertentu). Populasi awal dihasilkan secara hibrid, yaitu sebagian berdasarkan hasil default dari EPANET dan sebagian lagi dibangkitkan secara acak. Pada setiap generasi, solusi dievaluasi berdasarkan fungsi objektif berupa total biaya instalasi, serta diberikan penalti jika melanggar batas teknis seperti tekanan <10 meter dan kecepatan aliran <0,3 m/s atau >3 m/s.

Proses seleksi dilakukan dengan metode *rank-based selection*, yang memberikan peluang lebih besar pada solusi dengan *ranking* lebih tinggi untuk dipilih. Kemudian *Crossover* dilakukan dengan metode *single-point crossover* di posisi acak. Mutasi dilakukan dengan probabilitas 4% per gen, yang diproses menggunakan *Gray Code* untuk memastikan

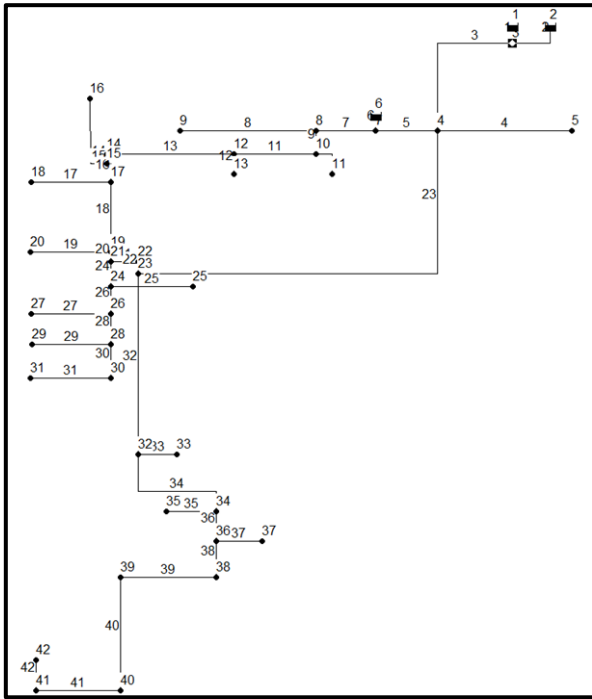
perubahan ukuran diameter pipa berjalan secara bertahap.

Algoritma berjalan hingga generasi dan populasi yang ditentukan, di mana solusi terbaik selalu diperbarui dan disimpan. Hasil optimasi kemudian dievaluasi kembali menggunakan EPANET 2.0 untuk memverifikasi apakah tekanan dan kecepatan aliran di seluruh *node* memenuhi kriteria teknis.

Evaluasi akhir dilakukan dengan membandingkan nilai *fitness* dari solusi akhir dan menghitung efisiensi biaya yang dicapai. Meskipun hasil menunjukkan masih adanya penalti pada beberapa segmen pipa akibat kecepatan aliran rendah, solusi secara keseluruhan tetap dinilai valid secara teknis dan efisien secara ekonomis, serta layak untuk diimplementasikan dalam skenario jaringan PDAM nyata.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pipa SPAM Sadu PDAM Tirta Raharja Kabupaten Bandung pada penelitian ini antara lain data panjang pipa dan kandidat solusi diameter pipa yang ada di pasaran serta harga satuan setiap diameter pipa. Dalam penelitian ini harga satuan sudah termasuk biaya galian, biaya urugan tanah, biaya pemasangan pipa, serta biaya jasa tukang. Gambar 1 memperlihatkan visualisasi jaringan pipa yang telah dimodelkan menggunakan perangkat lunak EPANET 2.0. Jaringan ini terdiri atas 42 segmen pipa yang saling terhubung, membentuk sistem distribusi air bersih dari sumber menuju berbagai titik layanan konsumen. Setiap elemen jaringan, termasuk pipa, simpul (*node*), dan *reservoir* atau sumber air, telah didefinisikan berdasarkan data teknis yang tersedia. Sebagian data panjang pipa ditunjukkan pada Tabel 1, data *demand* dari masing-masing *node* ditunjukkan pada Tabel 2 serta daftar harga pipa ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 1 Jaringan Pipa SPAM SADU

Tabel 1 Data Panjang Pipa

Pipa	Node Awal	Node Akhir	Panjang (m)
1	1	3	100
2	2	3	1000
3	3	4	2000
4	4	5	1200
5	7	4	500
6	6	7	200
7	7	8	600
⋮	⋮	⋮	⋮
38	36	38	1000
39	38	39	1600
40	39	40	1200
41	40	41	600
42	41	42	400

Sumber : PDAM Tirta Raharja Kabupaten Bandung

Tabel 2 Data Demand Node

Node	Base Demand
3	0
4	0
5	20

Node	Base Demand
7	0
8	0
9	14
10	0
⋮	⋮
39	15
40	0
41	0
42	15

Tabel 3 Kandidat Diameter

Diameter (mm)	Harga (Rp/m)
160	Rp354,400.00
200	Rp552,350.00
250	Rp860,750.00
355	Rp1,731,950.00
400	Rp2,198,950.00

Sumber : Harga Pipa HDPE di Tahun 2025

**MODEL**

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan diameter pipa optimal dalam jaringan distribusi air guna meminimalkan biaya total, dengan tetap memenuhi batasan hidraulik (tekanan minimum dan kecepatan aliran). Asumsi dibuat bahwa biaya per satuan panjang pipa tidak linier dengan diameter, meskipun biaya per satuan panjang meningkat seiring bertambahnya diameter. Fungsi objektif digunakan untuk menghitung biaya total jaringan pipa, termasuk biaya pemasangan, serta memastikan bahwa sistem memenuhi batasan hidraulik yang ditetapkan dan dapat dinyatakan dalam fungsi objektif berikut:

$$F(X) = \sum_{j=1}^{NVD} C_j(X_j^i)L_i + \lambda_1 \sum_{k=1}^{NR} \delta_k(H_{min,k} - H_k) + \lambda_2 \sum_{j=1}^{NVD} \delta_j(V_{max,j} - V_j) + \lambda_3 \sum_{j=1}^{NVD} \delta_j(V_j - V_{min,j})$$

Penjelasan mengenai fungsi objektif:

1. Biaya total pemasangan pipa

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

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

$C_j(X_j^i)$ : biaya pemasangan per satuan panjang berdasarkan diameter  $X_j^i$ .

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

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

$\delta_k$ : 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

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

$\delta_j$ : variabel indikator penalti yang bernilai 1 jika  $V_j > V_{max,k}$ , dan 0 jika tidak.

Jika  $V_j > V_{max,k}$  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

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

$\delta_j$ : 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. Hasil perhitungan dengan PGA berupa diameter setiap pipa disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Perhitungan Diameter Pipa Menggunakan PGA

Pipa	Diameter (mm)	Tekanan (m)	Kecepatan Aliran Air (m/s)	Biaya per Pipa (Rupiah)	Penalti (Rupiah)
1	350	49.97	0.31	173,195,000	
2	200	49.97	0.06	552,350,000	2,378,996
3	200	39.11	1.00	1,104,700,000	
4	200	36.29	0.64	662,820,000	
5	250	39.11	2.11	430,375,000	
6	350	47.43	2.27	346,390,000	
7	350	45.09	1.19	1,039,170,000	
8	200	43.87	0.45	552,350,000	
9	350	43.55	1.05	865,975,000	
10	250	43.46	0.24	258,225,000	555,380
11	350	42.34	0.92	865,975,000	
12	160	42.07	0.6	35,440,000	
13	350	41.78	0.8	519,585,000	
14	250	40.83	1.56	86,075,000	
15	350	40.81	0.14	519,585,000	1,648,807
16	160	40.83	2.42	70,880,000	



Pi pa	Diam eter (mm)	Teka nan (m)	Kecep atan Aliran Air (m/s)	Biaya per Pipa (Rupiah)	Penalti (Rupiah)
17	160	32.73	0.6	114,471,200	
18	160	33.61	1.17	354,400,000	
19	160	14.36	0.99	496,160,000	
20	160	24.12	0.18	35,440,000	1,199,530
21	250	24.09	0.88	86,075,000	
22	160	24.42	2.16	35,440,000	
23	350	27.35	1.19	5,195,850,000	
24	250	21.78	0.96	516,450,000	
25	250	21.57	0.29	430,375,000	147,943
26	250	20.98	0.67	344,300,000	
27	350	20.96	0.12	346,390,000	1,752,745
28	200	19.95	0.67	220,940,000	
29	160	14.54	0.5	992,320,000	
30	160	19.03	0.55	141,760,000	
31	160	15.34	0.55	567,040,000	
32	350	23.44	0.74	4,156,680,000	
33	200	22.83	0.45	276,175,000	
34	400	22.64	0.46	3,078,530,000	
35	250	22.42	0.3	430,375,000	46,084
36	350	22.01	0.45	1,731,950,000	
37	160	20.44	0.65	177,200,000	
38	200	17.03	0.95	552,350,000	
39	250	14.34	0.61	1,377,200,000	
40	200	12.68	0.48	662,820,000	
41	250	12.4	0.31	516,450,000	
42	200	11.85	0.48	220,940,000	

Pi pa	Diam eter (mm)	Teka nan (m)	Kecep atan Aliran Air (m/s)	Biaya per Pipa (Rupiah)	Penalti (Rupiah)
Total				31,141,171,200	7,729,485
Total Nilai <i>Fitness</i>				31,148,900,685	

Berdasarkan hasil implementasi PGA dengan parameter 35 populasi, 20 generasi, probabilitas *crossover* sebesar 70%, dan mutasi sebesar 4%, diperoleh konfigurasi diameter pipa yang memberikan total biaya instalasi minimum sebesar Rp 31.141.171.200. Nilai *fitness* minimum adalah Rp 31.148.900.685 sesuai dengan hasil pada Gambar 2. Setiap individu dalam populasi mewakili kombinasi diameter untuk seluruh pipa dalam jaringan, dan solusi terbaik dipilih berdasarkan nilai *fitness* terendah. Hasil menunjukkan bahwa seluruh simpul memenuhi tekanan minimum yang dipersyaratkan ( $\geq 10$  m), serta kecepatan aliran berada dalam rentang yang diizinkan (0,3 - 3 m/s), dengan pengecualian pada 7 segmen pipa yang memiliki kecepatan < 0,3 m/s. Hal ini disebabkan oleh penggunaan diameter yang relatif besar untuk mempertahankan tekanan, sehingga menurunkan kecepatan aliran. Meskipun demikian, penalti yang diterapkan tetap tergolong kecil dan tidak mempengaruhi validitas teknis dari solusi yang diperoleh.

Pipa	Diameter (m)	Panjang (m)	Biaya (Rp)
1	0.350	100.00	173,195,000
2	0.200	1000.00	552,350,000
3	0.200	2000.00	1,104,700,000
4	0.200	1200.00	662,820,000
5	0.250	500.00	430,375,000
6	0.350	200.00	346,390,000
7	0.350	600.00	1,039,170,000
8	0.200	1000.00	552,350,000
9	0.350	500.00	865,975,000
10	0.250	300.00	258,225,000
11	0.350	500.00	865,975,000
12	0.160	100.00	35,440,000
13	0.350	300.00	519,585,000
14	0.250	100.00	86,075,000
15	0.350	300.00	519,585,000
16	0.160	200.00	70,880,000
17	0.160	323.00	114,471,200
18	0.160	1000.00	354,400,000
19	0.160	1400.00	496,160,000
20	0.160	100.00	35,440,000
21	0.250	100.00	86,075,000
22	0.160	100.00	35,440,000
23	0.350	3000.00	5,195,850,000
24	0.250	600.00	516,450,000
25	0.250	500.00	430,375,000
26	0.250	400.00	344,300,000
27	0.350	200.00	346,390,000
28	0.200	400.00	220,940,000
29	0.160	2800.00	992,320,000
30	0.160	400.00	141,760,000
31	0.160	1600.00	567,040,000
32	0.350	2400.00	4,156,680,000
33	0.200	500.00	276,175,000
34	0.400	1400.00	3,078,530,000
35	0.250	500.00	430,375,000
36	0.350	1000.00	1,731,950,000
37	0.160	500.00	177,200,000
38	0.200	1000.00	552,350,000
39	0.250	1600.00	1,377,200,000
40	0.200	1200.00	662,820,000
41	0.250	600.00	516,450,000
42	0.200	400.00	220,940,000

\*\*Total Biaya:\*\* Rp31,141,171,200  
 \*\*Total Penalti (V + H):\*\* Rp7,729,485  
 \*\*Fitness Terbaik (Biaya + Penalti):\*\* Rp31,148,900,685  
 \*\*Solusi sudah optimal!\*\*

Gambar 2 Hasil Running Coding PGA

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PDAM Tirta Raharja atas pemberian data penelitian yang sangat berharga, serta kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penelitian ini, meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu.

## PENUTUP

### SIMPULAN

Penelitian ini berhasil membangun model optimisasi jaringan distribusi SPAM yang kemudian model diselesaikan dengan *Pseudo-Genetic Algorithm* (PGA) dengan pendekatan kombinatorial dan fungsi objektif berbasis biaya serta penalti teknis. Representasi alfanumerik dan mutasi berbasis *Gray Code* menjaga kestabilan eksplorasi solusi.

Implementasi pada jaringan PDAM Tirta Raharja Unit Sadu menghasilkan solusi teknis yang layak dan efisien, dengan biaya minimum Rp31,1 miliar. ...

Secara keseluruhan, PGA menunjukkan adaptasi terhadap batasan teknis memperkuat temuan (Mora-

Melia dkk., 2013) tentang pentingnya modifikasi algoritma genetika untuk stabilitas dan konvergensi. PGA layak dipertimbangkan sebagai pendekatan ringan, adaptif, dan efektif untuk optimasi desain jaringan distribusi air bersih berskala menengah.

## SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dikembangkan model matematika dengan mempertimbangkan topografi tanah dan permintaan air yang dinamis. Penelitian selanjutnya juga dapat menggunakan penggabungan PGA dengan algoritma lain (misalnya ACOOL atau *Ant Colony Optimization*) sebagai bentuk pendekatan *hybrid*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alkindi, H., Santosa, H., & Sutoyo, E. (2023). Analisis *Head losses* pada Circulating Fluida Air dalam Dua Jenis Pipa. In *Aplikasi Mekanika dan Energi: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* (Vol. 9, Issue 1).
- Awe, O. M., Okolie, S. T. A., & Fayomi, O. S. I. (2019). Optimization of Water Distribution Systems: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022068>
- Chen, Q., Zhong, Y., & Zhang, X. (2010). *A Pseudo Genetic Algorithm*. *Neural Computing and Applications*, 19(1), 77–83. <https://doi.org/10.1007/s00521-009-0237-3>
- Dairi, R. H., & Sukarmin, M. (2022). Sistem Jaringan Distribusi Perpipaian Air Bersih Di Kecamatan Mawasangka Timur Kabupaten Buton Tengah. *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil Unidayan*, XI (No.1).
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*.
- Jamil, R., & Mujeebu, M. A. (2019). *Empirical Relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach Equations for Cold and Hot Water Flow in Plastic Pipes*. *WATER*, 10, 104–114. <https://doi.org/10.14294/WATER.2019.1>
- Khairani, N., & Sirait, J. (2013). Membandingkan Kemangkusan Algoritma *Dinic* dan Algoritma Pelabelan *Ford-Fulkerson* untuk Masalah Arus Maksimum. Medan: Universitas Medan, 176–190.
- Lasut Stelea A. D., Mangangka Isri R., & Sompie Oktovian B. A. (2023). Evaluasi Sistem Penyediaan Air Minum Sineleyan Di Kota Tomohon (Vol. 21, Issue 86).
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2018). *Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design*. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w10030307>
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*.

- Mora-Melia, D., Iglesias-Rey, P. L., Martinez-Solano, F. J., & Fuertes-Miquel, V. S. (2013). *Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators*. *Water Resources Management*, 27(12), 4149–4162. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0400-6>
- Munir, R. (2010). *Matematika Diskrit*. <http://www.pakteguh.com>
- Rohiem, N. H., Patria, N., & Putra, U. (2021). Sistem Monitoring Kecepatan Motor dan Tekanan pada Saluran Air Berbasis *Internet of Things*.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual Versi Bahasa Indonesia*.
- Saleh, C. (2017). Optimasi Diameter Jaringan Pipa dalam Sistem Penyediaan Air Bersih (PDAM) di Kec. Bululawang Kab. Malang Menggunakan Linear Programming. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.22219/jmts.v15i1.4489>
- Saleh, C., Setyono, E., Syaiful Amal, A., & Rizhal Fauzi, M. (2020). Optimasi Diameter Jaringan Pipa Terbuka Menggunakan Linear Programming (Studi Kasus pada Sub Sistem Sumber Air Banyuning PDAM Kota Batu) *Optimization of Open Pipe Network Diameter Using Linear Programming (Case Study on the Banyuning Water Source Sub System PDAM Batu City)*. 18(2), 123–133. <https://doi.org/10.22219/jmts.v18i2.15338>
- Savic, D. A., & Walters, G. A. (1997). *Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67–77. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1997\)123:2\(67\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1997)123:2(67))
- Sulianto, Setiono, E., & Yasa, I. W. (2021). *Optimization Model The Pipe Diameter in The Drinking Water Distribution Network Using Multi-Objective Genetic Algorithm*. *Journal of Water and Land Development*, 48(1–3), 55–64. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136146>
- Suprpto, B. Y., & Sariman. (2012). Metode Algoritma Genetika dengan Sistem *Fuzzy Logic* untuk Penentuan Parameter Pengendali PID. In *Jurnal Rekayasa ElektriKa* (Vol. 10, Issue 1).
- Van Zyl, J. E., Savic, D. A., & Walters, G. A. (2004). Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid *Genetic Algorithm*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 160–170. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:2(160))
- Wisittipanich, W., & Buakum, D. (2019). *Optimal design of pipe diameter in water distribution system by multi-objective differential evolution algorithm: A case study of small town in Chiang Mai*. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 513, 351–360. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1059-1\\_33](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1059-1_33)
- Zamzami, Z., Azmeri, A., & Syamsidik, S. (2018). Sistem Jaringan Distribusi Air Bersih PDAM Tirta Tawar Kabupaten Aceh Tengah. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 1(1), 132–141. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v1i1.10330>