

Evaluasi Potensi *Head Loss* pada Sistem Distribusi Air Taman Gedung Bank BUMN di Surabaya Berdasarkan Konfigurasi Jaringan Perpipaan

Ali Akbar¹⁾, Rachmat Firdaus²⁾, Prantasi Harmi Tjahjanti³⁾, Rizky Dwi Aldiantofas⁴⁾

^{1,2,3,4)} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

E-mail: aliakbar@umsida.ac.id

Abstrak

Sistem distribusi air pada gedung bertingkat memerlukan jaringan perpipaan yang dapat mengalirkan air secara efektif ke seluruh titik penggunaan. Salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja sistem distribusi adalah *Head Loss* aliran yang terjadi akibat proses sepanjang pipa dan penggunaan berbagai aksesoris perpipaan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi *Head Loss* pada sistem distribusi air taman Komplek Gedung Bank BUMN Surabaya berdasarkan konfigurasi jaringan perpipaan eksisting dengan menggunakan pendekatan Darcy–Weisbach. Data penelitian ini diperoleh dari observasi lapangan, yang meliputi panjang pipa, diameter pipa, jumlah *fitting*, kapasitas tangki atap, dan konfigurasi jaringan distribusi. Sistem distribusi terdiri dari enam jalur perpipaan (*line 1–line 6*) yang menggunakan aliran gravitasi dari tangki atap berkapasitas 5000 L dengan ketinggian sekitar 28 m. Karakteristik geometri jaringan dan potensi *Head Loss* pada setiap jalur distribusi dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor utama yang mempengaruhi potensi *Head Loss* pada sistem distribusi air kebun adalah panjang pipa, diameter pipa, jumlah *fitting* dan percabangan. *Line 5* memiliki potensi *Head Loss* terbesar berdasarkan karakteristik jaringan karena memiliki jumlah titik keluaran dan *fitting* yang paling banyak, sedangkan *Line 6* memiliki potensi *Head Loss* yang lebih kecil karena konfigurasi jaringan yang lebih sederhana. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar evaluasi dan pengembangan sistem distribusi air berbasis gravitasi pada gedung bertingkat agar lebih efisien dan andal.

Kata Kunci: Distribusi air; *Head loss*; Jaringan pipa.

Abstract

Water distribution systems in multi-storey buildings require a piping network that can effectively distribute water to all points of use. One factor that influences the performance of the distribution system is head loss, that occurs due to the process along the pipe and the use of various piping accessories. The purpose of this study is to evaluate the potential energy loss in the garden water distribution system of the Surabaya State-Owned Enterprises Bank Building Complex based on the existing piping network configuration using the Darcy–Weisbach approach. The research data were obtained from field observations, which include pipe length, pipe diameter, number of fittings, roof tank capacity, and distribution network configuration. The distribution system consists of six piping lines (Line 1–Line 6) that use gravity flow from a 5000 L roof tank with a height of approximately 28 m. The network geometry characteristics and potential energy losses in each distribution line were analyzed. The results showed that the main factors that influence the potential energy loss in the garden water distribution system are pipe length, pipe diameter, number of fittings and branching. Line 5 has the greatest potential energy loss based on network

characteristics due to its large number of output points and fittings, while Line 6 has the potential for smaller energy losses due to its simpler network configuration. The results of this study can be used as a basis for evaluating and developing gravity-based water distribution systems in high-rise buildings to make them more efficient and reliable.

Keywords: *water distribution; head loss; pipe network.*

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi air merupakan bagian integral dari pengoperasian bangunan bertingkat untuk kebutuhan domestik, sanitasi, atau pemeliharaan lanskap. Air biasanya didistribusikan melalui sistem perpipaan ke titik-titik penggunaan di bangunan bertingkat. Air disuplai dari tangki penyimpanan ke titik-titik penggunaan. Kinerja sistem distribusi air sangat dipengaruhi oleh keadaan hidraulik jaringan perpipaan, *Head Loss* aliran yang disepanjang pipa maupun akibat penggunaan berbagai macam aksesoris perpipaan seperti *elbow*, *tee*, *reducer*, dan *valve*. Terlalu banyak *Head Loss* dapat mengurangi tekanan di lokasi penggunaan, sehingga distribusi air menjadi kurang optimal[1]–[4].

Head loss telah ditemukan sebagai parameter penting dalam desain dan evaluasi sistem perpipaan oleh beberapa penelitian. Sudirman melaporkan bahwa peningkatan panjang pipa sebesar 25% menyebabkan kenaikan head loss hingga 18% pada sistem distribusi air [5]. Hutagalung dan Aritonang menunjukkan bahwa diameter pipa yang lebih kecil menghasilkan *Head Loss* yang lebih besar dibandingkan pipa berdiameter besar pada debit yang sama[6]. Sementara itu, Fahrudin dan Mulyadi menemukan bahwa jumlah elbow dan tee memberikan kontribusi signifikan terhadap head loss minor pada jaringan perpipaan[7]. Persamaan *Darcy-Weisbach* adalah salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi *Head Loss* dalam sistem perpipaan karena dapat mempertimbangkan pengaruh karakteristik aliran dan geometri pipa secara lebih luas daripada metode empiris lainnya[8].

Penelitian tentang kehilangan tekanan dalam sistem perpipaan telah dilakukan secara luas, namun sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem perpipaan industri, laboratorium, dan sistem pemompaan[9]. Penelitian tentang karakteristik kehilangan tekanan dalam jaringan distribusi air kebun gedung bertingkat menggunakan aliran gravitasi dari tangki atap masih cukup terbatas. Dalam sistem seperti itu, *Head Loss* merupakan parameter yang sangat penting karena tidak ada pompa tambahan untuk mempertahankan tekanan aliran[10][11]. Oleh karena itu, analisis kehilangan tekanan diperlukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendistribusikan air secara efektif ke semua titik penyiraman. Evaluasi *Head Loss* juga penting sebagai dasar peningkatan efisiensi sistem distribusi air dan optimasi desain jaringan perpipaan[12].

Sistem distribusi air untuk kebun di Gedung Bank BUMN Surabaya menggunakan tangki atap dengan kapasitas 5.000 liter yang terletak pada ketinggian sekitar 28 meter di atas tanah. Air didistribusikan ke beberapa titik penyiraman kebun menggunakan jaringan pipa dengan berbagai ukuran pipa dan *fitting*. Kompleksitas konfigurasi jaringan tersebut berpotensi menimbulkan *Head Loss* yang dapat mempengaruhi tekanan dan debit air pada titik keluaran[13]. Kinerja sistem dapat ditingkatkan jika karakteristik *Head Loss* pada setiap jalur distribusi diketahui, oleh karena itu diperlukan evaluasi hidrolis.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi karakteristik hidraulik sistem distribusi air taman pada gedung bertingkat berdasarkan konfigurasi jaringan perpipaan *eksisting* yang memanfaatkan aliran gravitasi tanpa bantuan pompa. Kajian ini memberikan gambaran potensi *Head Loss* pada setiap jalur distribusi sebagai dasar perbaikan desain sistem.

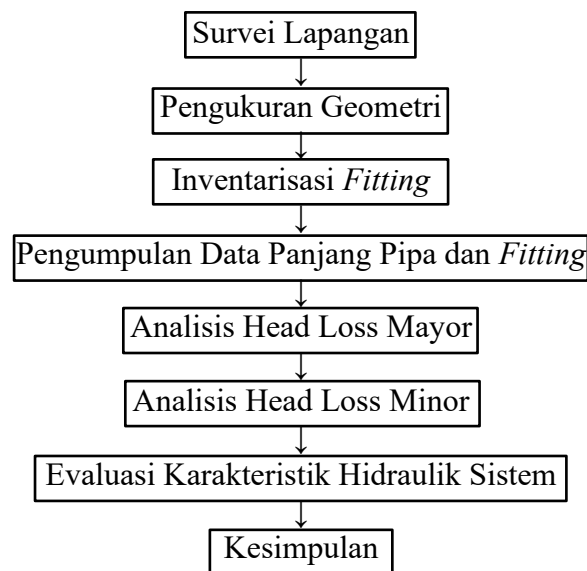
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi *Head Loss* (*head loss*) pada sistem distribusi air taman Gedung Bank BUMN di Surabaya berdasarkan konfigurasi jaringan perpipaan *eksisting* menggunakan pendekatan *Darcy-Weisbach*. Analisis dilakukan melalui beberapa skenario debit desain untuk mengetahui pengaruh panjang pipa, diameter pipa, dan jumlah *fitting* terhadap karakteristik hidraulik sistem distribusi air berbasis gravitasi.

2. METODE PENELITIAN

a. Material dan Peralatan

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi air taman Gedung Bank BUMN di Surabaya yang memanfaatkan aliran gravitasi dari *roof tank* menuju titik-titik penyiraman taman. Material utama yang dianalisis adalah jaringan perpipaan distribusi air yang terdiri atas pipa PVC berdiameter 2 inch, 1,5 inch, dan ½ inch, serta berbagai aksesoris perpipaan seperti *elbow*, *tee*, *reducer*, dan *gate valve*. Peralatan yang digunakan dalam penelitian meliputi meteran untuk pengukuran panjang pipa, kamera digital untuk dokumentasi lapangan, kalkulator teknik untuk perhitungan, serta perangkat lunak pengolah data untuk analisis hasil perhitungan.

b. Rancangan Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian

c. Variabel Penelitian

1) Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini antara lain : Panjang pipa, Diameter pipa dan Jumlah *fitting*

2) Variabel Terikat

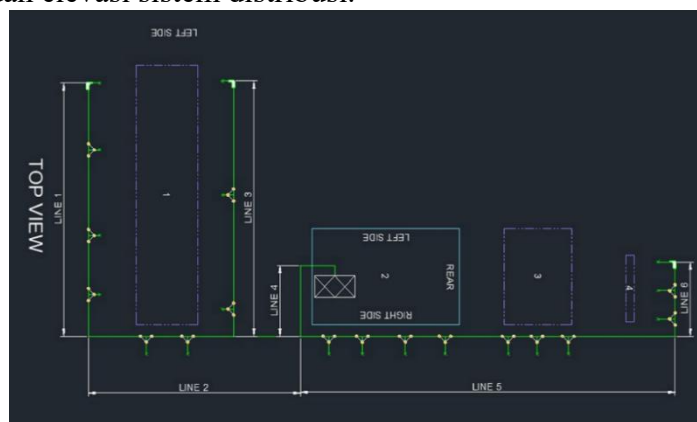
Variabel terikat dalam penelitian ini antara lain : *Head loss mayor*, *Head loss minor*, dan *Head loss total*.

3) Variabel Terkontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini antara lain: Jenis fluida, Temperatur fluida dan Material pipa.

d. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah jaringan distribusi air taman yang berasal dari *roof tank* berkapasitas 5000 liter yang ditempatkan pada elevasi sekitar 28 meter dari permukaan tanah. Sistem distribusi terdiri atas pipa utama, pipa cabang, serta beberapa titik keluaran yang digunakan untuk penyiraman taman. Data instalasi yang dianalisis meliputi panjang pipa, diameter pipa, jumlah *fitting*, jumlah percabangan, dan elevasi sistem distribusi.



Gambar 2. Instalasi pipa air taman

Sistem distribusi air taman terdiri atas satu jalur pipa utama yang menerima suplai dari *roof tank* dan bercabang menjadi enam jalur distribusi (*Line 1–Line 6*). Air didistribusikan menuju 19 titik kran penyiraman yang tersebar pada area taman. Konfigurasi jaringan perpipaan ditunjukkan pada Gambar 2. Analisis dilakukan berdasarkan panjang jalur pipa, jumlah percabangan, serta jumlah *fitting* yang terdapat pada masing-masing *line*.

e. Pengambilan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung pada sistem perpipaan eksisting. Data yang dikumpulkan meliputi:

- 1) Panjang pipa pada setiap jalur distribusi.
- 2) Diameter nominal pipa.
- 3) Jumlah dan jenis *fitting*.
- 4) Jumlah titik keluaran air.
- 5) Kapasitas *roof tank*.
- 6) Elevasi sistem distribusi.

Panjang pipa diukur menggunakan meteran dan diverifikasi berdasarkan konfigurasi instalasi yang terpasang. Jumlah *fitting* dan komponen perpipaan dicatat melalui inspeksi visual pada setiap jalur distribusi.

f. Parameter Fluida dan Asumsi Analisis

Fluida yang digunakan dalam sistem adalah air bersih dengan sifat fisik yang

diasumsikan konstan selama proses analisis. Parameter *fluida* secara jelas digambarkan dalam tabel 1.

Tabel 1. Parameter *Fluida*

Parameter	Nilai
Massa jenis air (ρ)	997 kg/m ³
Viskositas dinamis (μ)	0,00089 Pa·s
Percepatan gravitasi (g)	9,81 m/s ²
Temperatur air	27 °C

Untuk menyederhanakan analisis, digunakan beberapa asumsi sebagai berikut:

1. *Fluida* bersifat *inkompresibel*.
2. Aliran dianggap tunak (*steady flow*).
3. Tidak terjadi kebocoran pada sistem perpipaan.
4. Sifat fisik *fluida* dianggap konstan selama analisis.
5. Analisis dilakukan berdasarkan konfigurasi geometrik sistem perpipaan eksisting.

Pengukuran debit aktual tidak dapat dilakukan karena keterbatasan akses terhadap sistem. Oleh karena itu, analisis dilakukan menggunakan tiga skenario debit desain yang mewakili kondisi operasi rendah, sedang, dan tinggi pada sistem distribusi air taman. Nilai dari 3 skenario yang digunakan tertulis dalam tabel 2.

Tabel 2. Debit air berdasarkan skenario lapangan

Skenario	Debit (L/s)
Rendah	0,5
Sedang	1,0
Tinggi	1,5

g. Analisis Potensi *Head Loss*

Evaluasi dilakukan menggunakan indeks potensi *Head Loss* yang mempertimbangkan panjang pipa dan jumlah *fitting* sebagai parameter dominan yang mempengaruhi *Head Loss* pada jaringan perpipaan[11].

h. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis berdasarkan data geometrik jaringan perpipaan yang diperoleh dari observasi lapangan. Pengukuran debit aktual dan tekanan operasi tidak dapat dilakukan karena keterbatasan akses. Oleh karena itu, hasil penelitian difokuskan pada evaluasi karakteristik hidraulik dan potensi *Head Loss* berdasarkan konfigurasi jaringan perpipaan yang tersedia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Observasi Lapangan

Sistem distribusi air taman Gedung Bank BUMN Surabaya menggunakan tangki atap dengan kapasitas 5000 liter yang terletak pada ketinggian kurang lebih 28 meter dari permukaan tanah. Sistem gravitasi digunakan untuk mendistribusikan air ke 19 kran irigasi yang tersebar di sekitar area taman tanpa memerlukan pompa. Jaringan perpipaan terdiri dari pipa-pipa dengan diameter 2, 1,5 dan 0,5 inci dan panjang total masing-masing 30 m, 212 m dan 31,5 m. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan berbagai *fitting* seperti *elbow*, *tee*, *reducer* dan *gate valve* yang

dapat menyebabkan hilangnya energi aliran (*head loss*). Data lengkap ditampilkan pada tabel 3. Banyaknya percabangan menunjukkan bahwa hilangnya energi tidak hanya disebabkan oleh gesek sepanjang pipa (*head loss mayor*), melainkan juga oleh komponen-komponen perpipaan (*head loss minor*). Oleh karena itu, pengkajian fitur hidrolik diperlukan untuk mengetahui potensi *Head Loss* pada sistem distribusi air irigasi.

Tabel 3. Parameter kondisi lapangan

Parameter	Nilai
Roof tank	5000 L
Elevasi	28 m
Pipa 2"	30 m
Pipa 1,5"	212 m
Pipa 1/2"	31,5 m
Jumlah <i>fitting</i>	47 unit

b. Karakteristik Jaringan Perpipaan

Berdasarkan layout sistem perpipaan pada Gambar 1, jaringan distribusi air taman terdiri atas enam jalur distribusi utama (*Line 1–Line 6*) yang terhubung dengan pipa utama dari *roof tank*. Jalur distribusi memiliki karakteristik yang berbeda dari segi panjang pipa, jumlah *fitting*, dan jumlah titik keluaran. Perbedaan konfigurasi tersebut menyebabkan potensi *Head Loss* yang berbeda pada setiap *line*. Secara visual, Line 5 memiliki jalur distribusi terpanjang dengan jumlah titik keluaran terbanyak, sedangkan Line 6 memiliki konfigurasi yang relatif lebih sederhana.

c. Pengambilan Keputusan Desain

Tabel 4. Hasil Simulasi Debit Desain

Debit (L/s)	Kecepatan (m/s)	Re	f
0,5	0,38	17.000	0,028
1,0	0,76	35.000	0,024
1,5	1,14	52.000	0,022

Untuk menganalisis debit aktual yang tidak dapat diukur, dilakukan dengan pendekatan debit desain. Pendekatan ini umumnya digunakan untuk evaluasi awal sistem perpipaan untuk memperkirakan karakteristik hidraulik dari konfigurasi geometris pipa. Ketiga skenario pada tabel 4 tersebut digunakan untuk menilai dampak peningkatan debit terhadap potensi *Head Loss* dari sistem distribusi air berbasis gravitasi untuk taman tersebut[2].

d. Analisis Head Loss Mayor

Tabel 5. Karakteristik Jalur Distribusi

Line	Panjang Pipa 1,5" (m)	Panjang Pipa 1/2" (m)	<i>Fitting</i>
1	45	6	9
2	50	3	5
3	45	4,5	7
4	34	-	6

5	18	13,5	15
6	25	4,5	6

Tabel 6. Karakteristik Geometri Tiap Line

Line	Panjang Pipa (m)	Jumlah Kran	Jumlah Fitting	Karakteristik
1	51	4	9	Sedang
2	53	2	5	Panjang
3	49,5	3	7	Sedang
4	64,5	0	6	Jalur utama
5	31,5	7	15	Kompleks
6	29,5	3	6	Sederhana

Line 2 memiliki panjang pipa terbesar, sedangkan Line 5 memiliki jumlah fitting terbanyak. Kedua parameter tersebut berpotensi meningkatkan Head Loss pada sistem distribusi.

e. Analisis Head Loss Minor

Berdasarkan data fitting, diperoleh

Tabel 7. Data fitting

Komponen	Jumlah
Elbow 90°	5
Knee Reducer	22
Tee	2
Tee Reducer	16
Gate Valve	1
Reducer	1

Head loss minor dipengaruhi oleh jumlah dan jenis fitting. Komponen yang paling dominan adalah tee reducer dan knee reducer karena jumlahnya paling banyak pada sistem distribusi. Penggunaan reducer pada jaringan distribusi berpotensi menambah Head Loss akibat perubahan luas penampang sebagaimana dilaporkan oleh Rachmadani dkk[14]. Kondisi ini juga sesuai dengan hasil penelitian Waluyo dkk. yang menunjukkan bahwa penyempitan penampang meningkatkan kehilangan tekanan pada aliran[15].

f. Head Loss Total Setiap Jalur

Untuk mempermudah evaluasi karakteristik hidraulik, dilakukan penilaian potensi Head Loss berdasarkan panjang pipa dan jumlah fitting pada setiap jalur distribusi. Panjang pipa dan jumlah fitting dinormalisasi terhadap nilai maksimum pada masing-masing parameter, kemudian dihitung menjadi skor potensi head loss menggunakan Persamaan.

$$Skor = \left(\frac{L_i}{L_{max}} \times 50 \right) + \left(\frac{F_i}{F_{max}} \times 50 \right)$$

dimana:

L_i = panjang pipa pada jalur ke-i (m)

L_{max} = panjang pipa maksimum (m)

F_i = jumlah *fitting* pada jalur ke-i

F_{max} = jumlah *fitting* maksimum

Tabel 8. Skor Potensi *Head loss*

Line	Panjang	<i>Fitting</i>	Skor
1	51	9	69,53
2	53	5	57,76
3	49,5	7	61,70
4	64,5	6	70,00
5	31,5	15	74,42
6	29,5	6	42,87

Tabel 9. Potensi *Head Loss*

Line	Panjang Pipa	Jumlah <i>Fitting</i>	Potensi Head Loss
1	Sedang	Sedang	Sedang
2	Tinggi	Rendah	Sedang–Tinggi
3	Sedang	Sedang	Sedang
4	Tinggi	Sedang	Tinggi
5	Sedang	Sangat Tinggi	Tinggi
6	Rendah	Sedang	Rendah

Skor potensi *head loss* digunakan sebagai alat evaluasi komparatif antarjalur distribusi dan tidak dimaksudkan untuk menggantikan perhitungan head loss hidraulik secara rinci. Berdasarkan konfigurasi jaringan, *Line 5* memiliki potensi *Head Loss* terbesar karena jumlah *fitting* yang paling banyak. Sebaliknya, *Line 6* memiliki potensi *Head Loss* paling rendah karena panjang pipa relatif pendek dan jumlah *fitting* lebih sedikit. Temuan ini sesuai dengan penelitian Rijanto dan Rahayuningsih yang menyatakan bahwa kerugian head meningkat seiring bertambahnya panjang lintasan aliran dan faktor gesek pipa[16].

g. Analisis Sensitivitas Debit

Berdasarkan persamaan *Darcy–Weisbach*, *Head Loss* berbanding lurus terhadap kuadrat kecepatan aliran. Oleh karena itu, peningkatan debit akan meningkatkan kecepatan aliran dan menyebabkan kenaikan *head loss* secara signifikan. Pada sistem distribusi air taman ini, skenario debit tinggi diperkirakan menghasilkan *Head Loss* yang lebih besar dibandingkan skenario debit rendah, terutama pada jalur dengan panjang pipa dan jumlah *fitting* yang tinggi[17]. Hasil penelitian ini sejalan dengan Yani dkk. yang menunjukkan bahwa perubahan penampang dan sambungan pipa meningkatkan *Head Loss* aliran[4]. Penelitian Luthfi dan Yulianto menunjukkan bahwa nilai head loss meningkat pada pipa berdiameter lebih kecil sehingga diameter pipa menjadi parameter penting dalam desain sistem perpipaan [18].

h. Efisiensi Sistem Distribusi

Sistem distribusi air taman memanfaatkan *head* gravitasi sebesar 28 m tanpa bantuan pompa. Dengan konfigurasi jaringan yang ada, efisiensi distribusi dipengaruhi oleh panjang pipa dan jumlah *fitting* yang menyebabkan *Head Loss* sepanjang jalur aliran[19]. Jalur dengan jumlah *fitting* yang lebih sedikit dan

panjang pipa yang lebih pendek menunjukkan karakteristik distribusi yang lebih baik dibandingkan jalur yang memiliki banyak percabangan dan perubahan arah aliran[3]. Hasil ini mendukung penelitian Alkindi dkk. yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sambungan dan perubahan arah aliran menyebabkan kenaikan head loss mayor maupun minor[20].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi karakteristik hidraulik sistem distribusi air Gedung Bank BUMN di Surabaya, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi jaringan pipa yang terdiri dari enam saluran distribusi (*Line 1-line 6*) memiliki potensi *Head Loss* yang berbeda-beda akibat perbedaan panjang pipa, diameter pipa, jumlah *fitting*, dan cabang. Analisis menunjukkan bahwa saluran distribusi dengan panjang pipa dan jumlah *fitting* yang lebih banyak memiliki potensi *Head Loss* yang lebih besar dibandingkan saluran dengan konfigurasi yang lebih sederhana.

Berdasarkan karakteristik geometrisnya, Saluran 5 memiliki potensi *Head Loss* terbesar karena memiliki jumlah *outlet* dan *fitting* terbanyak, sedangkan Saluran 6 memiliki potensi *Head Loss* terendah karena panjang saluran dan jumlah *fitting* relatif kecil. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran dapat meningkatkan *Head Loss* secara signifikan karena *Head Loss* berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran.

Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi jaringan pipa merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja sistem distribusi air berbasis gravitasi. Dengan demikian, pemilihan diameter pipa yang tepat, pengurangan sambungan yang tidak perlu, dan konfigurasi jaringan yang lebih efektif dapat menjadi alternatif untuk meminimalkan *Head Loss* dan meningkatkan kinerja distribusi air di taman. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran debit dan tekanan aktual pada setiap jalur distribusi sehingga perhitungan head loss dapat dibandingkan secara langsung dengan kondisi operasi lapangan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. C. Study, J. Tyniec, J. Gwo, D. Andraka, and W. Kruszy, "Practical Aspects of the Energy Efficiency Evaluation of a Water Distribution Network Using Hydrodynamic," *Energies*, vol. 16, no. 3340, 2023, doi: 10.3390/en16083340.
- [2] D. Zaman, A. K. Gupta, V. Uddameri, M. K. Tiwari, and P. S. Ghosal, "Hydraulic performance benchmarking for effective management of water distribution networks: An innovative composite index-based approach," *J. Environ. Manage.*, vol. 299, p. 113603, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113603>.
- [3] J. Saldarriaga, P. Diego, C. Salcedo, P. Cuero, and L. Lunita, "A Direct Approach for the Near-Optimal Design of Water Distribution Networks Based on Power Use," *Water*, vol. 12, no. 1037, 2020, doi: 10.3390/w12041037.
- [4] A. Yani, Ratnawati, and A. Darmanto, "Analisa Kerugian Head Akibat Perluasan Dan Penyempitan Penampang Pada Sambungan 90o," *J. Tek. Juara, Aktif, Glob. Optimis STTI Bontang*, vol. 1, no. 1, pp. 46–55, 2021.
- [5] B. Journal, A. Electrical, S. Technology, P. Adi, B. Surabaya, and B. Tarakan, "Major and Minor Head Losses Analysis on The Piping System in

- Pondok Pesantren Tahfizhul Qur ' an Ibnu Abbas Tarakan," *J. Appl. Electr. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, 2021.
- [6] M. Hutagalung, J. Wira, and W. Aritonang, "BESARNYA HEAD LOSSES PADA ALIRAN PERPIPAAN DARI BOILER FEED WATER PUMP MENUJU BOILER DI PT . Z," *J. VOKASI Tek.*, vol. 1, no. 3, 2023, doi: 10.12345/xxxxx.
- [7] A. Fahrudin and M. Mulyadi, "Rancang Bangun Alat Uji Head Losses Dengan Variasi Debit Dan Jarak Elbow 900 Untuk Sistem Perpipaan Yang Efisien," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 32–35, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.680.
- [8] Y. H. Choi, "Qualification of Hydraulic Analysis Models for Optimal Design of Water Distribution Systems," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8152, 2021, doi: 10.3390/app11178152.
- [9] S. A. Wibiosno, A. Akbar, A. Fahrudin, R. Firdaus, and M. Syahril, "Analisis Pengaruh Variasi Bentuk Sudden enlargement terhadap Head loss pada Aliran Udara Laminar," *J. Mesin Nusant.*, vol. 8, no. 2, pp. 213–224, 2025, doi: 10.29407/jmn.v8i2.24788.
- [10] G. T. Patle, "Evaluation of a gravity-fed drip irrigation system under varying hydraulic head and land slope for hilly terrain," *AgricEngInt*, vol. 26, no. 3, pp. 1–10, 2024.
- [11] P. Galiatsatou *et al.*, "Combining Geographic Information Systems and Hydraulic Modeling to Analyze the Hydraulic Response of an Urban Area Under Different Conditions : A Case Study to Assist Engineering Practice," *Geograppies*, vol. 5, no. 17, pp. 1–25, 2025.
- [12] M. S. Marlim and D. Kang, "Energy intensity - based metric for optimal design of water distribution systems," *Appl. Water Sci.*, vol. 13, no. 9, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1007/s13201-023-01998-z.
- [13] C. W. S. Pipes, "Hydraulic and Technological Investigations of a Phenomenon Responsible for Increase of Major Head Losses in Exploited," *Water*, vol. 13, no. 1604, 2021, doi: 10.3390/w13111604.
- [14] D. G. Rachmadani, A. Akbar, and P. H. Tjahjanti, "Pengaruh Aspek Ratio Luasan Sudden enlargement Terhadap Head Loss es Aliran Laminar," *J. Mesin Nusanatara*, vol. 8, no. 1, pp. 22–30, 2025.
- [15] S. Waluyo, A. Akbar, P. H. Tjahjanti, and R. Firdaus, "Pengaruh Aspek Ratio Luasan Sudden Contraction Terhadap Head Loss Aliran Laminar," *J. Mesin Nusanatara*, vol. 7, no. 2, pp. 269–277, 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i2.22530.
- [16] P. H. Tjahjanti, Iswanto, A. Fahrudin, and R. R. Ernanda, "TEKNOLOGI TEPAT GUNA SEDERHANA PENGELOLAAN AIR JERNIH DI DESAWISATA SUMBERGEDANG PASURUAN," *Jurmas Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2021, doi: 10.47841/saintek.v2i1.40.
- [17] L. A. Evangelista, G. Meirelles, and B. Brentan, "Computational Model of Water Distribution Network Life Cycle Deterioration," *Sustainability*, vol. 15, no. 14529, 2023, doi: 10.3390/su151914529.
- [18] M. Luthfi and T. Yulianto, "Rancang Bangun Prototipe Fluid Friction Apparatus Untuk Menganalisis Kehilangan Energi (Head Loss) dengan Variasi Diameter Pipa," *Publ. Ris. Orientasi Tek. Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 29–35, 2023, doi: 10.26740/proteksi.v5n1.p29-35.
- [19] H. Truong, A. Tello, A. Lazovik, and V. Degeler, "Graph Neural Networks

-
- for Pressure Estimation in Water Distribution Systems,” *Water Resour. Res.*, vol. 60, 2024, doi: 10.1029/2023WR036741.
- [20] H. Alkindi, H. Santosa, and E. Sutoyo, “Analisis Head Losses Pada Circulating Fluida Air Dalam Dua Jenis Pipa,” *J. Ilm. Tek. Mesin AME*, vol. 9, no. 1, pp. 51–56, 2023.