

Evaluasi Kinerja Pompa *Booster* Berdasarkan Analisis *Head Loss* dan Total *Dynamic Head* pada Sistem Distribusi Air Bersih Gedung Bertingkat

Ali Akbar¹⁾, Rachmat Firdaus²⁾, Metatia Intan Mauliana³⁾, Diyas Robikh Arafat⁴⁾

¹⁻⁴⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia.

E-mail: ¹⁾ aliakbar@umsida.ac.id.

Abstrak

Pada sistem distribusi air bersih di gedung bertingkat, pompa pendorong (*Booster pump*) diperlukan untuk mengkompensasi perbedaan ketinggian dan kehilangan energi pada sistem perpipaan. Kinerja pompa sangat dipengaruhi oleh *head loss* akibat gesekan sepanjang pipa dan *fitting* yang digunakan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari kinerja pompa pendorong CDX/I 120/20 IE3 pada sistem distribusi air bersih menuju tangki atap Gedung Bank BUMN Surabaya dengan perhitungan *head loss* dan kesesuaian kapasitas pompa dengan kebutuhan sistem. Metode penelitian yang digunakan adalah observasional dan analitis, meliputi pengukuran dimensi pipa, identifikasi *fitting*, dan perhitungan parameter aliran menggunakan persamaan Darcy-Weisbach dan koefisien kehilangan energi *fitting*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total *head loss* sistem adalah 11,06 m, yang terdiri dari *head loss* mayor sebesar 9,58 m dan *head loss* minor sebesar 1,48 m. Kehilangan energi utama terjadi pada pipa berdiameter 1,5 inci dengan kontribusi sebesar 61,7% terhadap total *head loss*. Perhitungan Total Dynamic Head (TDH) memberikan nilai 39,06 m. Sebaliknya, *head* maksimum pompa adalah 40,50 m. Ini berarti *margin head* yang tersedia hanya 1,44 m. Hasil menunjukkan bahwa pompa masih mampu memenuhi kebutuhan distribusi air ke tangki atap pada ketinggian ± 28 m, meskipun bekerja mendekati batas kapasitas operasionalnya. Oleh karena itu, optimasi sistem perpipaan diperlukan untuk meningkatkan kinerja sistem dan keandalan distribusi air.

Kata Kunci: distribusi air bersih; *head loss*; pompa *Booster*; sistem perpipaan; total *Dynamic Head*.

Abstract

In the clean water distribution system in a multi-storey building, a Booster pump is needed to compensate for the height difference and energy loss in the piping system. Pump performance is greatly influenced by pressure loss due to friction along the pipes and fittings used. The purpose of this study is to study the performance of the CDX/I 120/20 IE3 Booster pump in the clean water distribution system to the rooftop tank of the Surabaya State-Owned Bank Building by calculating the pressure loss and the suitability of the pump capacity to the system requirements. The research method used is observational and analytical, including pipe dimension measurement, fitting identification, and flow parameter calculation using the Darcy-Weisbach equation and fitting energy loss coefficient. The results show that the total system pressure loss is 11.06 m, consisting of a major pressure loss of 9.58 m and a minor pressure loss of 1.48 m. The major energy loss occurs in the 1.5-inch diameter pipe with a contribution of 61.7% to the total pressure loss. The Total Dynamic Head (TDH) calculation gives a value of 39.06 m. In contrast, the maximum head of the pump is 40.50 m. This means the available head margin is only 1.44 m. The results indicate that the pump is still capable of meeting the water distribution needs to the rooftop tank at a height of approximately 28 m, despite operating near its operational capacity. Therefore, optimization of the piping system is necessary to improve the efficiency and reliability of water distribution.

Keywords: *Booster pump; clean water distribution, head loss; piping system; total Dynamic Head.*

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi air bersih pada gedung bertingkat hendaknya mempunyai tekanan yang cukup agar kebutuhan air pada titik tertinggi penggunaan air dapat terpenuhi secara optimal. Kinerja sistem distribusi air pada gedung bertingkat sangat dipengaruhi oleh pemilihan pompa yang sesuai dengan kebutuhan debit dan *head system*. Kesalahan dalam pemilihan kapasitas pompa dapat menyebabkan distribusi air tidak berjalan optimal terutama pada titik dengan elevasi tinggi[1]. Pompa *Booster* merupakan salah satu komponen utama yang berfungsi dalam menjaga kelangsungan distribusi air. Pompa *Booster* bekerja dengan cara menaikkan tekanan fluida, untuk mengantisipasi kehilangan energi yang disebabkan oleh perbedaan ketinggian, panjang jaringan pipa serta berbagai komponen aksesoris seperti *valve*, *elbow* dan *reducer* yang ada di dalam sistem distribusi[2].

Hilangnya energi (*head loss*) pada saluran pipa mengakibatkan penurunan tekanan dan laju aliran yang pada akhirnya menurunkan efisiensi distribusi air. Kerugian energi pada sistem perpipaan terdiri atas *head loss mayor* akibat gesekan sepanjang pipa dan *head loss minor* akibat *fitting* seperti *elbow*, *valve*, *reducer*, maupun perubahan diameter pipa. Besarnya *head loss* akan meningkat seiring bertambahnya debit dan kecepatan aliran fluida dalam sistem[3]. Semakin besar *head loss* maka semakin banyak energi yang harus disuplai oleh pompa untuk mempertahankan laju aliran dan tekanan yang dibutuhkan. Oleh karena itu, analisis *head loss* menjadi salah satu parameter penting dalam menilai kelayakan kapasitas pompa untuk memenuhi sistem distribusi air bersih[4], [5].

Kinerja pompa sentrifugal dan pompa pendorong dalam sistem distribusi air telah menjadi subjek beberapa penelitian. Penelitian mengenai sistem distribusi air gedung bertingkat telah dilakukan oleh Riki Candra Putra (2018) yang menganalisis kebutuhan kapasitas pompa berdasarkan *head* total sistem distribusi air pada gedung bertingkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang pipa dan kerugian aliran memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan *head* pompa[1]. Hidayat dan Fajri (2019) menganalisis kebutuhan daya pompa sentrifugal di gedung-gedung tinggi. Mereka menunjukkan bahwa karakteristik sistem perpipaan memengaruhi kebutuhan energi pompa[6]. Widodo dan Jayanto (2021) menganalisis kinerja kombinasi pompa seri dan paralel untuk meningkatkan efisiensi distribusi fluida[7]. Penelitian terkini mulai mengintegrasikan evaluasi performa pompa, optimasi operasi sistem, dan analisis jaringan distribusi untuk meningkatkan efisiensi distribusi air [8]–[10].

Namun, sebagian besar studi sebelumnya lebih memperhatikan karakteristik umum pompa, tetapi studi tentang kesesuaian kapasitas pompa *Booster* dengan kondisi instalasi aktual pada sistem distribusi air gedung bertingkat masih relatif terbatas. Evaluasi lebih lanjut, termasuk analisis *head loss*, kondisi pipa jaringan, dan kapasitas pompa untuk memenuhi kebutuhan distribusi air pada ketinggian tertentu, masih diperlukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kinerja sistem.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi kinerja pompa *Booster* tipe CDX/I 120/20 IE3 berdasarkan kondisi aktual sistem distribusi air bersih menuju *rooftank* gedung bertingkat. Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan perhitungan *head loss mayor*, *head loss minor*, karakteristik instalasi perpipaan, serta kemampuan pompa dalam memenuhi kebutuhan distribusi air pada elevasi

sekitar 28 meter.

Masalah ini terdeteksi pada sistem distribusi air bersih ke *rooftank* taman di gedung Bank BUMN Surabaya. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, pompa pendorong beroperasi dengan durasi yang relatif lama, terutama pada musim kemarau ketika kebutuhan air untuk menyiram kebun meningkat. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakcocokan antara kapasitas pompa dengan karakteristik sistem perpipaan yang digunakan. Panjang pipa dan perbedaan elevasi ke *rooftank* juga berpotensi menyebabkan kehilangan energi yang cukup signifikan untuk mempengaruhi kinerja distribusi air.

Permasalahan yang teridentifikasi mengarah pada tujuan penelitian ini, yaitu untuk menganalisis kinerja pompa pendorong dalam sistem distribusi air bersih ke *rooftank* dengan menghitung *head loss mayor*, *head loss minor*, dan mengevaluasi kesesuaian kapasitas pompa dengan kebutuhan sistem. Hasil penelitian diharapkan bermanfaat untuk optimasi sistem distribusi air dan untuk pemilihan pompa yang lebih baik sehingga meningkatkan kinerja sistem operasional dan keandalan sistem.

2. METODE PENELITIAN

a. Material dan Peralatan

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi air bersih ke tangki atap taman di Gedung Bank BUMN Surabaya. Sistem distribusi air bersih menggunakan dua unit pompa *Booster* tipe CDX/I 120/20 IE3 yang dipasang secara paralel dengan konfigurasi *duty-assist*. Pada kondisi beban normal, sistem dioperasikan menggunakan satu pompa. Ketika kebutuhan air meningkat dan level air pada *rooftank* berada di bawah batas yang ditentukan, pompa kedua dioperasikan untuk membantu pompa utama sehingga kapasitas debit sistem meningkat. Material utama yang digunakan adalah jaringan perpipaan PPR dengan diameter 1,5 inci dan 2 inci yang dilengkapi dengan *fitting* seperti *elbow*, *reducer*, dan *gate valve*.

Penelitian ini menggunakan peralatan berikut:

- Meter untuk mengukur panjang pipa
- Kamera digital untuk mendokumentasikan lapangan.
- Pompa sebagai sumber data parameter operasi untuk *nameplate*.
- Laptop dengan perangkat lunak perhitungan hidrolis Microsoft Excel.

b. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara observasi dan analisis. Tahapan penelitiannya adalah: identifikasi konfigurasi sistem perpipaan, pengumpulan data geometris instalasi, pengumpulan spesifikasi pompa, perhitungan parameter hidrolis, dan evaluasi kesesuaian kinerja pompa dengan kebutuhan sistem distribusi air bersih.

c. Variabel Penelitian

Variabel Bebas

- Panjang pipa.
- Diameter pipa.
- Jumlah *fitting* perpipaan.
- Debit aliran.

Variabel Terikat

- *head loss mayor*.
- *head loss minor*.
- Total *head loss*.
- Kinerja pompa *Booster*.

Variabel Terkontrol

- Fluida yang digunakan berupa air bersih.
- Temperatur fluida diasumsikan konstan.
- Kondisi instalasi perpipaan tetap selama penelitian.

d. Teknik Pengambilan Data

Data observasi langsung pada sistem distribusi air bersih. Panjang pipa, diameter pipa, jumlah *fitting*, dan elevasi sistem diukur. Spesifikasi data pompa diperoleh dari pelat nama pompa dan dokumen teknis yang tersedia di lokasi penelitian.

e. Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan mekanika fluida dan hidrolika perpipaan. Tahapan analisis meliputi:

- Perhitungan debit dan kecepatan aliran.
- Perhitungan bilangan Reynolds untuk menentukan karakteristik aliran.
- Perhitungan faktor gesekan dilakukan berdasarkan karakteristik aliran turbulen pada pipa PPR dengan menggunakan nilai faktor gesekan literatur sebesar 0,02.
- Perhitungan *head loss mayor* menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*.
- Perhitungan *head loss minor* berdasarkan koefisien kehilangan energi pada *fitting*.
- Perhitungan total *head loss*.
- Evaluasi kesesuaian kapasitas pompa terhadap kebutuhan sistem.

Evaluasi kapasitas pompa dilakukan berdasarkan konsep *Total Dynamic Head* (TDH) yang merupakan kombinasi *head* statis dan kehilangan energi akibat gesekan pada sistem perpipaan[11]–[13].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil

1) Data Sistem Perpipaan

Berdasarkan pengamatan lapangan, sistem distribusi air bersih ke tangki atap terdiri dari pipa PPR diameter 2 inci (0,0508 m) panjang 80 m dan pipa diameter 1,5 inci (0,0381 m) panjang 46,5 m dan elevasi *rooftop* = 28 m. Sistem perpipaan dilengkapi dengan 6 siku 2 inci, 5 siku 1,5 inci, 1 *Reducer*, dan 1 *Gate valve*.

2) Spesifikasi Pompa

Pompa yang digunakan adalah tipe pompa *Booster* CDX/I 120/20 IE3 dengan debit air (Q) 160 L/menit atau 0,00267 m³/s. Sistem ini menggunakan dua pompa secara paralel untuk memenuhi kebutuhan distribusi air ke tangki atap. Perhitungan dilakukan berdasarkan kondisi operasi satu pompa aktif dengan debit nominal 160 L/menit karena kondisi tersebut merupakan mode operasi normal sistem.

3) Hasil Perhitungan *head loss*

Perhitungan *head loss* dilakukan dengan mempertimbangkan kehilangan energi akibat gesekan sepanjang pipa (*head loss mayor*) dan kehilangan energi akibat *fitting* pipa (*head loss minor*). Berikut perhitungan *head loss*.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Parameter Aliran

Parameter	Pipa 2"	Pipa 1,5"
Diameter (m)	0,0508	0,0381
Luas penampang (m ²)	0,00203	0,00114
Kecepatan aliran (m/s)	1,31	2,34
Reynolds Number	66.500	89.100
Faktor gesekan	0,02	0,02

Kecepatan aliran pada pipa 1,5 inci lebih tinggi daripada pada pipa 2 inci, berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya luas penampang aliran akibat perubahan diameter pipa dari 2 inch menjadi 1,5 inch sehingga kecepatan aliran meningkat. Bilangan Reynolds untuk kedua segmen pipa di atas berada di atas 4000 yang menunjukkan bahwa aliran bersifat turbulen.

Tabel 2. Hasil Perhitungan *head loss*

Komponen	<i>head loss</i> (m)	Kontribusi (%)
Pipa 2"	2,76	24,9
Pipa 1,5"	6,82	61,7
Elbow 2"	0,39	3,5
Elbow 1,5"	1,05	9,5
Gate valve	0,015	0,1
Reducer	0,028	0,3
Total <i>head loss</i>	11,06	100

Tabel 2 menunjukkan kehilangan energi maksimum terjadi pada pipa 1,5 inci dengan nilai 6,82 m atau sekitar 61,7% dari total *head loss* sistem, sedangkan *head loss* pada pipa 2 inch hanya sebesar 24,9%. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan pipa dengan diameter lebih kecil pada jalur vertikal menjadi penyumbang utama kehilangan energi dalam sistem. Selain itu, perubahan diameter pipa dari 2 inch menjadi 1,5 inch menyebabkan peningkatan kecepatan aliran dari 1,31 m/s menjadi 2,34 m/s sehingga kehilangan energi akibat gesekan meningkat secara signifikan.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Total *Dynamic Head*

Parameter	Nilai
<i>Head statis</i>	28,00 m
<i>head loss mayor</i>	9,58 m
<i>head loss minor</i>	1,48 m
Total <i>head loss</i>	11,06 m
TDH sistem	39,06 m
<i>Head maksimum pompa</i>	40,50 m
Margin <i>head</i>	1,44 m

Berdasarkan Tabel 3, diperoleh *Total Dynamic Head* (TDH) sistem sebesar 39,06 m. Nilai tersebut mendekati *head* maksimum pompa sebesar 40,50 m sehingga *margin head* yang tersedia hanya 1,44 m. *head loss mayor* menyumbang 86,6% dari seluruh kehilangan energi sistem, sedangkan *head loss minor* hanya menyumbang 13,4%. Ini menunjukkan bahwa panjang dan diameter pipa merupakan faktor yang lebih signifikan daripada *fitting*.

b. Pembahasan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa panjang pipa merupakan faktor dominan yang memengaruhi kehilangan energi pada sistem distribusi air bersih. Semakin panjang pipa yang dilalui fluida, semakin besar gesekan antara fluida dan dinding pipa, sehingga semakin besar pula *head loss* (*head loss*) pada sistem. Kehilangan energi tidak hanya disebabkan oleh panjang pipa, tetapi juga oleh keberadaan *fitting*. Meskipun *head loss minor* lebih kecil daripada *head loss mayor*, jumlah *head loss minor* tetap memengaruhi total kebutuhan tekanan pompa. Hasil ini sesuai dengan penelitian Ermadi dan Darmanto yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan dan debit aliran menyebabkan peningkatan *head loss* baik pada pipa lurus maupun komponen *fitting*[3]. Hasil penelitian ini juga mendukung temuan bahwa pengelolaan tekanan dan pengurangan kehilangan energi merupakan faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi air[14].

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *Total Dynamic Head* (TDH) sistem adalah 39,06 m yang cukup dekat dengan *head* maksimum pompa yaitu 40,5 m. *Margin head* hanya 1,44 m berarti pompa bekerja mendekati batas operasionalnya. Hal ini membuat sistem sensitif terhadap peningkatan kebutuhan laju aliran, penambahan *fitting*, dan penurunan kinerja pompa karena usia operasional. Pada akhirnya, waktu pengisian tangki atap dapat meningkat, dan pompa harus bekerja lebih lama untuk memenuhi kebutuhan air[15], [16].

Sistem ini menggunakan dua pompa, yang dipasang secara paralel, untuk meningkatkan volume aliran. Secara teori, kapasitas keseluruhan dapat mencapai 320 L/menit. Namun, peningkatan laju aliran menyebabkan peningkatan *head loss* dalam sistem perpipaan sehingga laju aliran aktual yang dicapai diperkirakan lebih rendah daripada kapasitas teoritis akibat meningkatnya *head loss* sistem seiring bertambahnya debit aliran. Kondisi ini menunjukkan bahwa laju aliran tidak selalu meningkat sebanding dengan jumlah pompa karena keterbatasan karakteristik sistem perpipaan dan persyaratan *head* sistem[17], [18].

Berdasarkan hasil tersebut, salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja sistem adalah mengurangi kehilangan energi pada jalur distribusi, misalnya dengan mempertahankan diameter pipa yang lebih besar pada jalur vertikal atau mengurangi jumlah *fitting* yang tidak diperlukan. Upaya tersebut dapat meningkatkan *margin head* yang tersedia dan memperbaiki kinerja sistem distribusi air menuju *rooftank*.

Pompa harus menyediakan energi tambahan untuk mengatasi perbedaan ketinggian yang disebabkan oleh kondisi instalasi pada ketinggian sekitar 28 m. Oleh karena itu, kapasitas tekanan pompa harus mampu menampung kombinasi tekanan statis dan total *head loss* yang terjadi dalam sistem. Ketika total tekanan sistem mendekati atau bahkan lebih tinggi dari kapasitas maksimum pompa, kinerja distribusi air akan menurun, yang ditunjukkan oleh peningkatan waktu pengisian tangki atap dan peningkatan durasi operasi pompa.

c. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Hidayat dan Fajri (2019) yang menyatakan bahwa kehilangan energi dalam sistem perpipaan berpengaruh terhadap kebutuhan daya pompa[6]. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Altowayti et al. (2021) yang menunjukkan bahwa peningkatan *head loss* pada jaringan distribusi air secara langsung mempengaruhi kinerja hidrolis sistem dan kebutuhan energi pemompaan [5]. Perbedaan antara penelitian ini dan penelitian sebelumnya terletak pada objek penelitian yang menggunakan sistem distribusi air bersih aktual di gedung-gedung tinggi dengan evaluasi langsung kesesuaian kapasitas pompa dan kondisi jaringan pipa yang digunakan. Sehingga hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi teknis dalam mengoptimalkan sistem distribusi air bersih di gedung-gedung bertingkat. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan berbagai penelitian optimasi sistem distribusi air yang menekankan pentingnya evaluasi karakteristik hidrolis jaringan dan kapasitas pompa dalam menjaga keandalan sistem distribusi air[19], [20].

Nilai TDH yang diperoleh pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan beberapa penelitian laboratorium karena sistem distribusi yang dianalisis memiliki elevasi statis mencapai 28 m. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perbedaan elevasi menjadi komponen dominan dalam kebutuhan *head* pompa pada aplikasi gedung bertingkat. Selain itu, Nasrollahi et al. (2021) menjelaskan bahwa evaluasi kapasitas pompa berdasarkan kebutuhan tekanan aktual sistem merupakan langkah penting untuk menjaga keandalan distribusi air pada bangunan bertingkat [2].

Perubahan geometri penampang aliran berpengaruh terhadap besarnya *head loss*. Perubahan luas penampang menyebabkan perubahan distribusi kecepatan dan tekanan yang berdampak pada peningkatan kehilangan energi aliran[21], [22].

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi kesesuaian kapasitas pompa *Booster* terhadap kebutuhan *head* sistem aktual pada instalasi distribusi air bersih gedung bertingkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun pompa masih mampu melayani sistem, *margin head* yang tersedia sangat kecil sehingga diperlukan perhatian terhadap perubahan kondisi operasi yang dapat meningkatkan kebutuhan *head* sistem. Hasil penelitian ini juga mendukung penelitian Batista do Egito et al. (2023) yang menekankan pentingnya optimasi operasi pompa berdasarkan karakteristik sistem distribusi air yang dilayani[10].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis sistem distribusi air bersih ke tangki atap di Gedung Bank BUMN Surabaya, total *head loss* yang diperoleh adalah 11,06 m yang terdiri dari *head loss* mayor sebesar 9,58 m dan *head loss* minor sebesar 1,48 m. Kehilangan energi terbesar terjadi pada bagian pipa dengan diameter 1,5 inci yang menyumbang 61,7% dari total *head loss* sistem. Hasil menunjukkan bahwa faktor utama yang mempengaruhi kehilangan energi pada sistem distribusi air bersih adalah diameter dan panjang pipa.

Perhitungan *Total Dynamic Head* (TDH) diperoleh hasil 39,06 m sedangkan *head* maksimum pompa *Booster* CDX/I 120/20 IE3 adalah 40,50 m. Hanya tersisa *margin head* 1,44 m, sehingga pompa masih mampu melayani kebutuhan distribusi air menuju *rooftank* pada elevasi ± 28 m, namun beroperasi mendekati batas

kapasitas operasional. Dalam kasus peningkatan permintaan aliran, penambahan hambatan aliran atau penurunan kinerja pompa karena usia operasional, kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem. Oleh karena itu, optimalisasi sistem perpipaan dengan mengurangi kehilangan energi dan evaluasi kapasitas pompa secara berkala diperlukan untuk meningkatkan keandalan dan kinerja sistem distribusi air. Selanjutnya pengukuran debit aktual dan tekanan operasi di lapangan disarankan dilakukan sehingga evaluasi kinerja pompa dapat dilakukan berdasarkan kondisi operasional yang lebih representatif.

5. DAFTAR PUSTAKA :

- [1] R. C. Putra, "Perancangan Pompa Sentrifugal dan Diameter Luar Impeller Untuk Kebutuhan Air Kapasitas 60 Lpm di Gedung F Dan D Universitas Muhammadiyah Tangerang," *J. Tek. Univ. Muhammadiyah Tangerang*, vol. 7, no. 1, pp. 15–25, 2018.
- [2] H. Nasrollahi *et al.*, "Optimization of Water Pressure of a Distribution Network within the Water – Energy Nexus," *Appl. Sci.*, vol. 11, 2021, doi: 10.3390/app11188371.
- [3] D. Ermadi and Darmanto, "PERANCANGAN ALAT PRAKTIKUM PENGUJIAN HEADLOSS ALIRAN FLUIDA TAK TERMAMPATKAN," *J. Ilm. Cendekia Eksakta*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2017.
- [4] C. S. Silvia, M. Safriani, and M. Ikhsan, "Analysis of water distribution systems and head losses using the hardy-cross method," in *4th International Conference on Coastal and Delta Areas (ICCCA 4 2021)*, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/955/1/012029.
- [5] W. A. H. Altowayti *et al.*, "Evaluating the Pressure and Loss Behavior in Water Pipes Using," *Water*, vol. 13, no. 3500, pp. 1–20, 2021.
- [6] M. F. Hidayat and N. Fajri, "Analisa Perhitungan Daya Pompa Sentrifugal Di Gedung Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta," *J. Kaji. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 7–14, 2019.
- [7] R. D. Jayanto, E. Widodo, R. Firdaus, and A. Akbar, "Perencanaan Manufaktur Instalasi Pompa Sentrifugal Laboratorium Teknik Mesin Dengan Kombinasi Rangkaian Seri dan Paralel," *J. Rekayasa Energi Manufaktur*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.21070/r.e.m.v6i1.1547.
- [8] M. Adraoui, E. B. Diop, S. A. E. Abdem, R. Azmi, and J. Chenal, "Towards an Understanding of Hydraulic Sensitivity : Graph Theory Contributions to Water Distribution Analysis," *Water*, vol. 16, no. 646, pp. 1–22, 2024.
- [9] F. Salmasi, J. Abraham, and A. Salmasi, "Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems," *Appl. Water Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01577-8.
- [10] T. B. do Egito, J. R. G. de Azevedo, and S. de T. M. Bezerra, "Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs," *Water Supply*, vol. 23, pp. 1094–1105, 2023, doi: 10.2166/ws.2023.065.
- [11] PSG Dover, "Measuring Total Dynamic Head," 2026.
- [12] Grundfos, "Pump selection basics Calculating Total Dynamic Head," 2022.
- [13] S. Already, "How to Quickly Calculate a Centrifugal Pump 's Total Dynamic Head Learn safe assumptions when calculating the total head of a".
- [14] Y. Tian *et al.*, "Optimization of Pressure Management in Water Distribution

- Systems Based on Pressure-Reducing Valve Control : Evaluation and Case Study,” *Sustainability*, vol. 15, 2023, doi: 10.3390/su151411086.
- [15] N. Reeh, G. Manthei, and P. J. Klar, “Determining the *Head* Characteristics of Radial Centrifugal *Pumps* under the Impact of Prewhirl,” *Appl. Sci.*, vol. 14, 2024, doi: 10.3390/app14167224.
- [16] M. H. Dulaimi, M. R. Torkomany, and E. Gooda, “Upgrading Existing Water Distribution Networks Using Cluster-Based Optimization Techniques,” *Water*, vol. 17, 2025, doi: 10.3390/w17071072.
- [17] Y. Guo, S. Wang, A. F. Taha, and T. H. Summers, “Optimal *Pump* Control for Water Distribution Networks via Data-based Distributional Robustness,” *Arxiv*, pp. 1–16, 2022.
- [18] L. Latchoomun, T. Sockalingum, K. V. Poullé, R. T. F. A. King, K. K. Busawon, and J. P. Barbot, “Design of a Water Pressure Boosting System for Pressure-Driven Demand in a Distribution Network,” in *2018 5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/EFEA.2018.8617085.
- [19] O. M. Awe, S. T. A. Okolie, and O. S. I. Fayomi, “Optimization of Water Distribution Systems : A Review,” in *International Conference on Engineering for Sustainable World*, 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1378/2/022068.
- [20] M. Sunela, *Real-Time Control Optimization of Water Distribution System with Storage*. Tallinn, Estonia: Tallinn University Of Technology, 2017.
- [21] D. G. Rachmadani, A. Akbar, and P. H. Tjahjanti, “Pengaruh Aspek Ratio Luasan Sudden enlargement Terhadap *head loss* es Aliran Laminar,” *J. Mesin Nusantara*, vol. 8, no. 1, pp. 22–30, 2025.
- [22] S. Waluyo, A. Akbar, P. H. Tjahjanti, and R. Firdaus, “Pengaruh Aspek Ratio Luasan Sudden Contraction Terhadap *head loss* Aliran Laminar,” *J. Mesin Nusantara*, vol. 7, no. 2, pp. 269–277, 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i2.22530.