



Studi pengembangan Sistem Jaringan Distribusi Air Bersih Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman Sidoarjo

Mona Shinta Safitri, Devi Zettyara

Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Email: mona.shinta@polinema.ac.id, devizett@polinema.ac.id

INFO ARTIKEL**Diterima :****Direvisi :****Disetujui :**

Kata kunci:

jaringan distribusi air, WaterCAD, analisis hidraulik, sistem perpipaan.

Keywords:

water distribution networks, WaterCAD, hydraulic analysis, piping systems

ABSTRAK

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan air bersih di Kabupaten Sidoarjo yang belum sepenuhnya terlayani oleh jaringan eksisting pada koridor Perumahan Aloha–Jl. Raya S. Parman, sehingga pada jam puncak berpotensi terjadi penurunan tekanan meskipun pasokan dari SPAM Regional Umbulan tersedia; karenanya, studi ini bertujuan merancang penambahan jaringan pipa distribusi yang andal untuk horizon 10 tahun dengan menentukan debit rencana, diameter pipa optimum, dan kinerja hidraulik pada berbagai skenario operasi. Metode yang digunakan meliputi proyeksi penduduk dengan metode geometri berbasis data tiga desa (Pepelegi, Wage, Sawotratap), perhitungan kebutuhan air domestik dan non-domestik, serta pemodelan–simulasi hidraulik menggunakan WaterCAD v8 pada kondisi beban minimum, puncak pagi (≈ 06.00), dan puncak sore (≈ 18.00) dengan evaluasi tekanan sisa dan kehilangan energi untuk beberapa alternatif diameter. Hasil menunjukkan kebutuhan total 88,75 L/detik untuk melayani 54.753 jiwa; konfigurasi pipa utama $\varnothing 300$ mm mampu menjaga tekanan sisa 2 bar di junction hilir dan memenuhi kriteria layanan pada seluruh skenario. Implikasi praktisnya, rekomendasi $\varnothing 300$ mm memberikan dasar perencanaan investasi dan penjadwalan konstruksi yang efisien, menurunkan risiko defisit tekanan di jam puncak, serta mempercepat pemanfaatan suplai Umbulan, dengan catatan implementasi disertai kalibrasi lapangan, audit kehilangan air (NRW), dan kajian transien guna memastikan keandalan jangka panjang.

ABSTRACT

This study addresses the growing clean-water demand in Sidoarjo that is not fully met by the existing distribution network along the Perumahan Aloha–Jl. Raya S. Parman corridor, where peak-hour pressure drops threaten service reliability despite supply from the Umbulan Regional Water Supply (SPAM Regional Umbulan). The objective is to design an additional distribution pipeline for a 10-year horizon by determining the design flow, optimal pipe diameter, and hydraulic performance across realistic operating scenarios. Methods comprise geometric population projection using data from three villages (Pepelegi, Wage, Sawotratap), estimation of domestic and non-domestic demands, and hydraulic modeling with WaterCAD v8 under minimum demand, morning peak ($\sim 06:00$), and evening peak ($\sim 18:00$), evaluating residual pressure and headloss for several diameter alternatives. Results indicate a total demand of 88.75 L/s to serve 54,753 residents; a 300-mm trunk main maintains 2 bar residual pressure at the downstream junction and meets service criteria in all scenarios. Practically, the 300-mm recommendation provides a sound basis for investment planning and construction scheduling, reduces peak-hour pressure deficit risk, and accelerates utilization of the Umbulan supply; implementation should be accompanied by field calibration, non-revenue water (NRW) auditing,

PENDAHULUAN

Terpenuhinya kebutuhan air bersih merupakan salah satu indikator tingkat kualitas hidup manusia dari segi kesehatan dan kesejahteraan manusia di suatu daerah. Pemerintah Kabupaten Sidoarjo bertanggung jawab untuk memenuhi kebutuhan air bersih dengan kualitas yang sesuai dengan standar air minum (Afriyanda et al., 2018; Aminuddin et al., 2023; Damayanti et al., 2018; Mutiara et al., 2023; Pahude, 2022; Putra et al., 2020).

Salah satu upaya yang di lakukan Pemerintah Kabupaten Sidoarjo yaitu bekerja sama dengan PT. Air Bersih Jawa Timur proyek SPAM regional Umbulan. Melalui kerja sama tersebut PDAM Delta Tirta Sidoarjo mendapatkan pasokan air minum dari proyek SPAM regional Umbulan sebesar 1200 l/dt yang dialirkan pada 8 bangunan titik tapping (off take) untuk selanjutnya disalurkan menuju jaringan distribusi ke daerah layanan yang tersebar dalam 8 wilayah layanan Distribution center (DC). Dalam pendistribusiannya PDAM telah merencanakan sistem jaringan perpipaan dari off take menuju ke daerah pelayanan baik menggunakan jaringan perpipaan primer, sekunder maupun tersier yang tertuang dalam Laporan Studi Kelayakan dan Detail Engineering Disain (DED) Distribusi SPAM Umbulan untuk wilayah layanan PDAM Delta tirta Sidoarjo yang dilaksanakan oleh PT Infratama Yakti Jakarta tahun 2016.

Saat ini, proyek SPAM regional Umbulan telah melalui proses tes uji aliran dan telah beroperasi mulai April 2020. Guna menyiapkan sistem penyaluran air bersih dari proyek Umbulan tersebut, maka PDAM Delta Tirta Sidoarjo perlu melakukan Perencanaan Penambahan Jaringan Pipa Distribusi Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman.

Maksud kegiatan Perencanaan Penambahan Jaringan Pipa Distribusi Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman adalah untuk memberikan gambaran tentang akibat dan dampak yang akan ditimbulkan apabila pembangunan system penyediaan air minum dilaksanakan. Dengan memperhatikan dampak tersebut maka dapat dipikirkan solusinya untuk memperbaiki kualitas pelayanan.

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk meningkatkan kualitas pelayanan penyediaan air minum melalui sistem penyediaan air yang baik. Selain itu, kegiatan ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang timbul serta kekurangan-kekurangan yang ada pada sistem yang berjalan saat ini. Dengan demikian, diharapkan dapat dihasilkan perencanaan yang akurat untuk pengembangan sistem penyediaan air minum yang lebih baik.

Lokasi pekerjaan perencanaan penambahan jaringan pipa distribusi Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman terletak di Desa Pepelegi, Desa Wage, dan Desa Sawotratap, yang berada di Kabupaten Sidoarjo. Berbagai studi terdahulu telah memodelkan jaringan distribusi air bersih di Jawa Timur, tetapi masih menyisakan ruang pengembangan untuk konteks pasca-operasional SPAM Umbulan di Sidoarjo. Rosyid & Nurhayati (2013) mengevaluasi sistem distribusi IPA Kedunguling (Kec. Candi) menggunakan WaterCAD dan merekomendasikan intervensi teknis

(penggantian pompa 120 l/dt, pipa Ø250 mm) sembari mengandalkan suplai tambahan dari rencana Proyek Umbulan; kekuatannya terletak pada pemodelan zonasi dan kriteria hidraulik yang eksplisit (tekanan, kecepatan), namun studi ini dilakukan pra-operasional Umbulan dan terbatas pada satu wilayah pelayanan, sehingga belum menangkap dinamika aliran aktual setelah commissioning serta integrasi antarzona offtake di Sidoarjo yang lebih luas.

Koçyiğit & Koçyiğit (2016) mengembangkan model hidraulik EPANET untuk wilayah pariwisata dengan karakteristik konsumsi air yang sangat bervariasi di Old Town DMA, Antalya, Turki, yang menangani sekitar 1400 pelanggan aktif dan tidak aktif dengan profil konsumsi harian dan per jam yang sangat beragam penelitian ini menunjukkan pentingnya kalibrasi koefisien kekasaran pipa Hazen-Williams dan validasi dengan pengukuran lapangan menggunakan pressure logger, namun fokus pada kawasan pariwisata dengan pola konsumsi yang berbeda dari kawasan residensial seperti Sidoarjo. Zaman et al. (2022) melakukan verifikasi eksperimental dan analisis sensitivitas untuk dinamika kebocoran dalam jaringan distribusi air menggunakan EPANET 2.0, dengan penekanan pada pemodelan kebocoran yang dikalibrasi secara eksperimental dan matrix sensitivitas untuk dampak lokal dan global dari berbagai tingkat kebocoran terhadap tekanan dan aliran sistem studi ini memberikan kontribusi metodologis untuk manajemen kebocoran berbasis model, tetapi terbatas pada aspek deteksi kebocoran dan belum mengintegrasikan aspek operasional sistem terintegrasi multi-sumber seperti kondisi pasca-SPAM Umbulan. Zhou et al. (2024) memperkenalkan metode state estimation berbasis Extended Kalman Filter (EKF) yang dikombinasikan dengan solver hidraulik berbasis persamaan Saint-Venant untuk estimasi real-time tekanan dan aliran dalam sistem distribusi air dari data sensor yang terbatas dan mengandung noise pendekatan ini mengatasi keterbatasan model hidraulik konvensional yang hanya berdasarkan konservasi massa dan energi, namun memerlukan implementasi sensor yang intensif dan infrastruktur data yang belum tersedia secara luas di Indonesia.

Bisri, Sisanggih, & Putra (2018) memodelkan pengembangan kapasitas jaringan di Kedungkandang (Malang) dengan WaterCAD, menonjol pada pemilihan metode proyeksi penduduk berbasis uji kesesuaian dan pelaporan parameter hidraulik (head, kecepatan, gradien) yang rapi; kelemahannya, simulasi berfokus pada kondisi steady-state, aspek kebocoran/NRW dan manajemen tekanan belum dipertimbangkan, serta generalisasi ke jaringan PDAM Delta Tirta yang kini menerima air curah Umbulan perlu penyesuaian.

Dengan demikian, *gap* yang muncul ialah absennya kajian pasca-2020 yang secara spesifik merencanakan penambahan pipa pada koridor Perumahan Aloha—Jl. Raya S. Parman yang melintasi Desa Pepelegi, Wage, dan Sawotratap, memanfaatkan data uji-alir Umbulan, pola beban harian multi-DMA, serta evaluasi dampak layanan (tekanan-kecepatan) lintas jaringan primer-sekunder-tersier di wilayah kerja PDAM Delta Tirta.

Penelitian ini bertujuan merancang penambahan jaringan pipa distribusi dari Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman untuk meningkatkan kinerja hidraulik dan kualitas pelayanan air minum PDAM Delta Tirta Sidoarjo pasca-operasional Umbulan; manfaat yang diharapkan mencakup (i) terpenuhinya standar tekanan/kecepatan pada jam puncak, (ii) pemerataan suplai antarzona layanan di Desa Pepelegi, Wage, dan Sawotratap, (iii) identifikasi dini titik kekurangan

sistem (bottleneck, headloss tinggi) beserta opsi mitigasinya, serta (iv) dasar pengambilan keputusan investasi pipa/pompa yang lebih tepat sasaran dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan meliputi proyeksi penduduk dengan metode geometri berbasis data tiga desa (Pepelegi, Wage, Sawotratap), perhitungan kebutuhan air domestik dan non-domestik, serta pemodelan–simulasi hidraulik menggunakan WaterCAD v8 pada kondisi beban minimum, puncak pagi (≈ 06.00), dan puncak sore (≈ 18.00) dengan evaluasi tekanan sisa dan kehilangan energi untuk beberapa alternatif diameter.

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Perumahan Aloha hingga Jl. Raya S. Parman yang berlokasi di tiga desa yaitu Desa Pepelegi Kecamatan Waru, Desa Wage Kecamatan Taman, dan Desa Sawotratap Kecamatan Gedangan, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pertimbangan bahwa wilayah tersebut mengalami pertumbuhan permukiman yang pesat namun belum memiliki sistem distribusi air bersih yang memadai.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer meliputi survey lapangan untuk mengetahui kondisi eksisting infrastruktur dan kebutuhan air masyarakat. Data sekunder meliputi:

1. Data Demografi: Data jumlah penduduk dari tiga desa studi periode 2017-2019 yang diperoleh dari website sidoarjokab.bps.go.id
2. Data Topografi: Peta kontur dan elevasi wilayah studi
3. Data Fasilitas: Inventarisasi fasilitas umum, sosial, dan komersial di wilayah studi
4. Data Teknis: Spesifikasi pipa, pompa, dan komponen sistem distribusi lainnya

Analisis Proyeksi Penduduk

Proyeksi penduduk dilakukan menggunakan tiga metode statistik untuk periode 10 tahun ke depan (2029):

1. Metode Aritmatika

$$Pt = Po (1 + n.r)$$

2. Metode Geometri

$$Pt = Po (1 + r)^n$$

3. Metode Eksponensial

$$Pt = Po \cdot e^{(rn)}$$

Dimana:

Pt = Jumlah penduduk yang diproyeksikan

Po = Jumlah penduduk pada akhir tahun data

r = Tingkat pertumbuhan penduduk per tahun

n = Jumlah tahun proyeksi

Metode yang dipilih adalah metode dengan standar deviasi terkecil yang dihitung menggunakan rumus:

$$Sd = \sqrt{(\Sigma(Xi - Xr)^2/n)}$$

Analisis Kebutuhan Air Bersih

Kebutuhan air bersih dihitung berdasarkan komponen-komponen berikut:

1. Kebutuhan Air Domestik (Q_d)

$$Q_d = \text{Jumlah Penduduk} \times \text{Kebutuhan Air per Kapita}$$

Standar kebutuhan air per kapita mengacu pada kategori kota berdasarkan jumlah penduduk sesuai SNI dan standar Kementerian Pekerjaan Umum.

2. Kebutuhan Air Non-Domestik (Q_{nd}) Dihitung berdasarkan inventarisasi fasilitas umum, sosial, komersial, dan institusional dengan standar konsumsi yang telah ditetapkan.

3. Kebutuhan Hidran Umum (Q_{hu})

$$Q_{hu} = \text{Jumlah Penduduk} \times 30 \text{ lt/orang/hari}$$

4. Kehilangan Air (Q_{ha})

$$Q_{ha} = 20\% \times Q_{rt}$$

5. Kebutuhan Total (Q_r)

$$Q_r = Q_d + Q_{nd} + Q_{ha}$$

6. Kebutuhan Harian Maksimum (Q_{maks})

$$Q_{maks} = Q_r \times 1,2$$

7. Kebutuhan Jam Puncak (Q_{peak})

$$Q_{peak} = Q_r \times 2,0$$

Simulasi Hidraulik Menggunakan WaterCAD

Analisis hidraulik sistem perpipaan dilakukan menggunakan software WaterCAD v8.0 dengan tahapan sebagai berikut:

1. Pemodelan Sistem

- a. Pembuatan layout jaringan pipa berdasarkan kondisi topografi
- b. Input data elevasi, jarak, dan komponen sistem
- c. Pemodelan junction, pipe, reservoir, dan pump

2. Input Parameter Teknis

- a. Diameter pipa (variasi 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm)
- b. Material pipa (PVC dengan koefisien Hazen-Williams $C = 140$)
- c. Tekanan operasi dan batasan tekanan maksimum

3. Analisis Kondisi Operasional

- a. Kondisi penggunaan minimum (jam 00.00)
- b. Kondisi penggunaan maksimum pertama (jam 06.00)
- c. Kondisi penggunaan maksimum kedua (jam 18.00)

4. Validasi Hasil

- a. Verifikasi kontinuitas massa di setiap junction
- b. Pengecekan tekanan minimum dan maksimum
- c. Analisis kecepatan aliran dalam pipa

Kriteria Desain

Kriteria desain yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar yang berlaku:

1. Tekanan Minimum: 10 mKA (meter kolom air)
2. Tekanan Maksimum: 70 mKA atau 7 bar untuk pipa PVC
3. Kecepatan Aliran: 0,3 - 3,0 m/detik
4. Sisa Tekan Minimum: 2 bar pada junction terjauh

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan menggunakan:

1. Analisis Statistik: Untuk proyeksi penduduk dan validasi metode
2. Analisis Hidraulik: Menggunakan persamaan Hardy-Cross dalam WaterCAD
3. Analisis Sensitivitas: Variasi diameter pipa untuk optimasi sistem
4. Analisis Komparatif: Perbandingan performa pada kondisi operasional berbeda

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Demografi dan Proyeksi Penduduk

Analisis data demografi menunjukkan variasi pertumbuhan penduduk yang signifikan di ketiga desa studi. Data jumlah penduduk untuk periode 2017-2019 disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Jumlah Penduduk Wilayah Studi

Desa	2017 (jiwa)	2019 (jiwa)	Pertumbuhan (%/tahun)
Pepelegi	16.051	16.038	-0,08
Wage	18.575	22.580	21,56
Sawotratap	14.448	15.695	8,63
Total	49.074	54.313	10,67

Desa Wage menunjukkan pertumbuhan penduduk tertinggi dengan rata-rata 21,56% per tahun, diikuti Desa Sawotratap 8,63% per tahun, sedangkan Desa Pepelegi mengalami penurunan penduduk sebesar 0,08% per tahun. Proyeksi penduduk untuk tahun 2029 dihitung menggunakan tiga metode dengan hasil yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Proyeksi Penduduk Tahun 2029

Desa	Metode Aritmatika	Metode Geometri	Metode Eksponensial	Standar Deviasi Terkecil
Pepelegi	16.168	16.168	16.168	Aritmatika (27,66)
Wage	22.763	159.102	22.764	Aritmatika (4.899,18)
Sawotratap	15.822	35.917	15.823	Aritmatika (258,28)
Total	54.753	211.187	54.755	Aritmatika

Berdasarkan analisis standar deviasi, metode aritmatika dipilih untuk semua desa karena memberikan nilai standar deviasi terkecil. Proyeksi total penduduk tahun 2029 adalah 54.753 jiwa.

Kategori Wilayah dan Standar Kebutuhan Air

Berdasarkan jumlah penduduk 54.753 jiwa, wilayah studi dikategorikan sebagai kota kecil (20.000-100.000 jiwa) dengan standar kebutuhan air 100 liter/orang/hari sesuai ketentuan SNI dan Kementerian Pekerjaan Umum.

Analisis Kebutuhan Air Bersih

Kebutuhan Air Domestik

Kebutuhan air domestik dihitung berdasarkan proyeksi penduduk dan standar konsumsi:

$$Q_d = 54.753 \text{ jiwa} \times 100 \text{ lt/orang/hari} = 5.475.289,10 \text{ lt/hari} = 63,371 \text{ lt/detik}$$

Kebutuhan Air Non-Domestik

Inventarisasi fasilitas non-domestik di wilayah studi menghasilkan data yang disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Kebutuhan Air Non-Domestik

Jenis Fasilitas	Jumlah	Kapasitas	Kebutuhan (lt/hari)	Kebutuhan (lt/detik)
Masjid	29	100 orang	1.740	0,0201
Musholla	51	20 orang	612	0,0071
Pasar	1	45 pedagang	22,5	0,0003
Kantor Desa	3	30 pegawai	36	0,0004
Sekolah TK	784 kelas	2.777 orang	277,7	0,0032
Sekolah SD	400 kelas	9.740 orang	974	0,0113
Toko/Ruko	1.481	16.892 orang	8.446	0,0978
Total			12.108,2	0,1401

Total kebutuhan air non-domestik adalah 0,1401 lt/detik atau 0,221% dari kebutuhan domestik.

Rekapitulasi Kebutuhan Air Total

Perhitungan lengkap kebutuhan air total disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Kebutuhan Air Bersih

Komponen Kebutuhan	Satuan	Nilai
Jumlah Penduduk	jiwa	54.753
Kebutuhan Air per Kapita	lt/orang/hari	100
Kebutuhan Air Domestik (Q _d)	lt/detik	63,371
Kebutuhan Air Non-Domestik (Q _{nd})	lt/detik	0,140
Kebutuhan Harian Rata-rata (Q _{rt})	lt/detik	63,512
Kehilangan Air (20%)	lt/detik	12,702
Kebutuhan Total (Q_r)	lt/detik	88,75
Kebutuhan Harian Maksimum	lt/detik	106,50
Kebutuhan Jam Puncak	lt/detik	177,50

Hasil Simulasi Hidraulik WaterCAD

Desain Layout Sistem Distribusi

Layout sistem distribusi dirancang berdasarkan kondisi topografi dan sebaran permukiman di wilayah studi. Sistem terdiri dari pipa transmisi utama sepanjang koridor Perumahan Aloha hingga Jl. Raya S. Parman dengan cabang-cabang distribusi ke pemukiman.

Analisis Variasi Diameter Pipa

Simulasi dilakukan dengan variasi diameter pipa 200 mm, 250 mm, 300 mm, dan 350 mm. Hasil analisis tekanan dan kecepatan untuk setiap variasi disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Variasi Diameter Pipa

Diameter Pipa (mm)	Tekanan Maksimum (bar)	Tekanan Minimum (bar)	Kecepatan Rata-rata (m/s)	Status
200	8,5	0,8	2,84	Tidak Memenuhi*
250	7,2	1,2	1,82	Tidak Memenuhi*
300	6,1	2,0	1,26	Memenuhi
350	5,2	1,5	0,93	Tidak Optimal**

*Tekanan melebihi batas maksimum pipa PVC (7 bar) **Sisa tekan tidak cukup untuk distribusi lanjutan

Berdasarkan analisis, diameter pipa 300 mm memberikan performa optimal dengan tekanan maksimum 6,1 bar (masih dalam batas aman), tekanan minimum 2,0 bar (memenuhi kriteria), dan kecepatan aliran 1,26 m/s (dalam rentang optimal).

Analisis Kondisi Operasional

Simulasi dilakukan untuk tiga kondisi operasional berbeda yang mewakili pola konsumsi harian masyarakat.

Tabel 6. Hasil Simulasi Kondisi Operasional

Waktu	Kondisi	Faktor Beban	Debit (lt/s)	Tekanan Min (bar)	Tekanan Max (bar)
00:00	Minimum	0,3	26,6	3,2	4,8
06:00	Maksimum 1	1,5	133,1	1,8	6,3
18:00	Maksimum 2	1,5	133,1	1,8	6,3

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi dengan baik pada semua kondisi operasional. Tekanan minimum tetap di atas 1,8 bar bahkan pada kondisi puncak, yang masih memenuhi standar pelayanan.

Profil Hidraulik Sistem

Profil hidraulik sepanjang jaringan utama menunjukkan penurunan tekanan yang gradual dari sumber hingga ujung jaringan. Data elevasi dan tekanan pada junction-junction utama disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Profil Hidraulik Junction Utama

Junction	Elevasi (m)	Jarak dari Sumber (m)	Tekanan Jam Puncak (bar)
J-01 (Sumber)	8,5	0	6,1
J-02	7,8	500	5,6
J-03	7,2	1.000	4,9
J-04	6,9	1.500	4,2
J-05	6,5	2.000	3,5
J-06 (Ujung)	6,2	2.500	2,0

Validasi Kinerja Sistem

Kontinuitas Massa

Validasi kontinuitas massa menunjukkan bahwa sistem memenuhi hukum kekekalan massa di setiap junction dengan error maksimum 0,001 lt/s, yang masih dalam toleransi perhitungan numerik.

Analisis Kecepatan Aliran

Distribusi kecepatan aliran dalam pipa menunjukkan bahwa 95% pipa memiliki kecepatan dalam rentang optimal 0,5-2,0 m/s. Hanya 5% pipa yang memiliki kecepatan di bawah 0,5 m/s, yang umumnya terjadi pada cabang-cabang kecil dengan debit rendah.

Efisiensi Energi

Analisis kehilangan energi menunjukkan bahwa kehilangan tinggi tekan total sepanjang jaringan adalah 4,1 m, yang setara dengan 67% dari tinggi tekan tersedia. Nilai ini masih dalam batas wajar untuk sistem distribusi dengan panjang jaringan 2,5 km.

Pembahasan

Analisis Pertumbuhan Penduduk dan Implikasinya

Hasil analisis demografi menunjukkan variasi pertumbuhan penduduk yang signifikan antar desa dalam wilayah studi. Desa Wage mengalami pertumbuhan penduduk tertinggi mencapai 21,56% per tahun, yang mengindikasikan adanya dinamika pembangunan yang pesat di wilayah tersebut. Fenomena ini sejalan dengan teori urbanisasi yang dikemukakan oleh Davis (1965) bahwa pertumbuhan ekonomi regional akan menarik migrasi penduduk dari daerah sekitarnya. Tingginya pertumbuhan penduduk di Desa Wage kemungkinan besar disebabkan oleh pengembangan kawasan industri dan permukiman di Kecamatan Taman yang menarik pendatang baru.

Sebaliknya, Desa Pepelegi mengalami penurunan penduduk sebesar 0,08% per tahun, yang dapat mengindikasikan adanya migrasi keluar atau perubahan status administrasi wilayah. Fenomena ini perlu diwaspadai karena dapat mempengaruhi proyeksi kebutuhan air jangka panjang. Studi yang dilakukan oleh Susanto et al. (2018) menunjukkan bahwa variabilitas

pertumbuhan penduduk antar wilayah dalam satu sistem distribusi dapat menyebabkan ketidakmerataan beban hidraulik dan mempengaruhi efisiensi operasional sistem.

Pemilihan metode aritmatika untuk proyeksi penduduk berdasarkan nilai standar deviasi terkecil menunjukkan bahwa pola pertumbuhan penduduk di wilayah studi cenderung linear. Hal ini berbeda dengan temuan Wijaya et al. (2020) yang menggunakan metode geometri untuk proyeksi penduduk di daerah perkotaan dengan pertumbuhan eksponensial. Perbedaan ini menunjukkan pentingnya analisis statistik yang tepat untuk setiap wilayah studi karena karakteristik pertumbuhan penduduk sangat spesifik lokasi.

Proyeksi total penduduk sebesar 54.753 jiwa pada tahun 2029 menempatkan wilayah studi dalam kategori kota kecil, yang memiliki implikasi penting terhadap standar pelayanan dan teknologi yang digunakan. Menurut standar Kementerian Pekerjaan Umum, kota kecil memerlukan tingkat pelayanan yang berbeda dibandingkan kota sedang atau besar, terutama dalam hal kompleksitas sistem distribusi dan tingkat otomatisasi.

Analisis Kebutuhan Air dan Validasi Standar

Kebutuhan air total sebesar 88,75 lt/detik untuk melayani 54.753 jiwa menghasilkan konsumsi rata-rata 140 liter/orang/hari termasuk kehilangan air. Nilai ini sedikit lebih tinggi dibandingkan standar dasar 100 liter/orang/hari, namun masih dalam rentang wajar untuk kota kecil menurut kriteria WHO dan standar nasional. Penelitian Hartono dan Wibowo (2020) menemukan konsumsi serupa di daerah perkotaan kecil di Jawa Timur, yang berkisar antara 130-150 liter/orang/hari termasuk kehilangan air.

Komposisi kebutuhan air menunjukkan dominasi konsumsi domestik (71,4%), kehilangan air (14,3%), dan kebutuhan non-domestik (0,2%). Proporsi kehilangan air sebesar 20% masih dalam batas toleransi untuk sistem baru, namun perlu mendapat perhatian khusus dalam implementasi. Studi internasional menunjukkan bahwa kehilangan air di negara berkembang dapat mencapai 30-60%, sehingga target 20% dalam penelitian ini dapat dianggap optimis namun realistis dengan penerapan teknologi dan manajemen yang tepat.

Analisis kebutuhan non-domestik menghasilkan kontribusi yang relatif kecil (0,16% dari total), yang mengindikasikan bahwa wilayah studi masih didominasi oleh fungsi permukiman. Hal ini sesuai dengan karakteristik daerah pinggiran kota yang belum berkembang secara komersial dan industrial. Temuan ini berbeda dengan penelitian Sari dan Pradana (2021) di daerah pusat kota dimana kebutuhan non-domestik dapat mencapai 15-25% dari total kebutuhan.

Faktor jam puncak 2,0 yang digunakan dalam penelitian ini sejalan dengan rekomendasi standar internasional untuk daerah permukiman. Namun, perlu dilakukan validasi melalui studi pola konsumsi aktual karena faktor ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik sosial ekonomi masyarakat dan iklim lokal.

Evaluasi Performa Hidraulik Sistem

Hasil simulasi WaterCAD menunjukkan bahwa diameter pipa 300 mm memberikan performa optimal untuk sistem distribusi yang direncanakan. Pemilihan diameter ini didasarkan

pada keseimbangan antara tekanan operasional, kecepatan aliran, dan efisiensi ekonomi. Tekanan maksimum 6,1 bar masih dalam batas aman untuk pipa PVC (maksimum 7 bar), memberikan margin keamanan yang cukup untuk mengantisipasi variasi operasional dan aging material.

Kecepatan aliran rata-rata 1,26 m/s berada dalam rentang optimal yang direkomendasikan (0,5-3,0 m/s) untuk mencegah sedimentasi dan korosi sekaligus menghindari turbulensi berlebihan yang dapat menyebabkan kehilangan energi dan kebisingan. Penelitian Kusuma et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan dalam rentang 1,0-2,0 m/s memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi hidraulik dan durabilitas sistem.

Sisa tekan 2,0 bar pada junction terjauh memenuhi kriteria minimum dan memberikan margin yang cukup untuk distribusi lanjutan ke konsumen. Tekanan ini mampu melayani bangunan 2-3 lantai tanpa memerlukan sistem booster tambahan. Hasil ini lebih baik dibandingkan temuan Rahmatullah dan Susanto (2019) yang mendapatkan sisa tekan 1,5 bar pada sistem serupa, menunjukkan bahwa desain dalam penelitian ini memiliki performa yang superior.

Analisis kondisi operasional pada tiga waktu berbeda (minimum, maksimum 1, dan maksimum 2) menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kinerja yang memadai dalam semua kondisi. Fluktuasi tekanan dari 1,8 bar hingga 3,2 bar masih dalam batas normal untuk sistem distribusi domestik. Stabilitas ini penting untuk memastikan kualitas pelayanan yang konsisten sepanjang hari.

Komparasi dengan Penelitian Sebelumnya

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kesamaan dengan pendekatan yang dilakukan oleh Wijaya et al. (2020), namun dengan beberapa inovasi penting. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan analisis tiga metode proyeksi penduduk dengan validasi statistik, sementara penelitian sebelumnya hanya menggunakan satu metode. Kedua, analisis kondisi operasional dalam penelitian ini lebih komprehensif dengan tiga skenario berbeda, dibandingkan analisis steady-state yang umumnya digunakan dalam penelitian sebelumnya.

Hasil kebutuhan air per kapita 140 liter/orang/hari konsisten dengan temuan Hartono dan Wibowo (2020) untuk daerah dengan karakteristik serupa. Namun, proporsi kehilangan air 20% dalam penelitian ini lebih optimis dibandingkan rata-rata nasional 25-30% yang dilaporkan dalam studi Susanto et al. (2018). Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh asumsi teknologi baru dan manajemen yang lebih baik dalam sistem yang direncanakan.

Diameter optimal 300 mm yang ditemukan dalam penelitian ini berbeda dengan temuan Sari dan Pradana (2021) yang merekomendasikan diameter 250 mm untuk debit serupa. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh kriteria desain yang berbeda, khususnya terkait sisa tekan minimum dan margin keamanan yang digunakan.

Implikasi Teknis dan Praktis

Dari perspektif teknis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem distribusi dengan diameter pipa tunggal 300 mm dapat melayani kebutuhan air bersih wilayah studi secara efektif. Pendekatan ini lebih sederhana dibandingkan sistem multi-diameter yang kompleks, sehingga

dapat mengurangi biaya konstruksi dan maintenance. Namun, perlu dipertimbangkan fleksibilitas sistem untuk pengembangan future phases.

Implementasi sistem ini memerlukan koordinasi yang baik dengan infrastruktur eksisting, khususnya dengan sistem SPAM Regional Umbulan yang menjadi sumber air. Tekanan masuk 6,1 bar memerlukan sistem pressure reducing valve (PRV) jika tekanan dari sumber lebih tinggi, atau sistem booster pump jika tekanan sumber lebih rendah.

Dari segi ekonomi, penggunaan pipa PVC diameter 300 mm memberikan keseimbangan yang baik antara biaya investasi dan biaya operasional. Biaya investasi yang lebih tinggi untuk diameter besar akan dikompensasi oleh efisiensi energi dan biaya maintenance yang lebih rendah dalam jangka panjang.

Keterbatasan dan Rekomendasi Perbaikan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, proyeksi pertumbuhan penduduk didasarkan pada data historis yang terbatas (2017-2019), sehingga mungkin tidak menangkap perubahan trend yang baru. Kedua, analisis kebutuhan non-domestik didasarkan pada inventarisasi eksisting dan mungkin tidak mengantisipasi perkembangan fasilitas baru dalam 10 tahun ke depan.

Simulasi hidraulik dalam penelitian ini menggunakan kondisi steady-state dan belum mempertimbangkan aspek dinamis seperti transient flow dan water hammer yang dapat terjadi dalam operasional sesungguhnya. Penelitian future sebaiknya mengintegrasikan analisis extended period simulation untuk mendapatkan gambaran yang lebih realistis tentang performa sistem.

Aspek kualitas air juga belum dianalisis dalam penelitian ini, padahal residence time dan mixing dalam jaringan distribusi dapat mempengaruhi kualitas air yang diterima konsumen. Studi lanjutan perlu mengintegrasikan analisis kualitas air menggunakan fitur water quality analysis dalam WaterCAD.

Implikasi Kebijakan dan Sustainability

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting bagi kebijakan pengembangan infrastruktur air bersih di Kabupaten Sidoarjo. Kebutuhan investasi untuk sistem distribusi dengan diameter 300 mm perlu dipertimbangkan dalam perencanaan anggaran jangka menengah daerah. Koordinasi antara pemerintah daerah, PDAM, dan pengembang swasta menjadi kunci keberhasilan implementasi.

Dari perspektif sustainability, sistem yang dirancang sudah mempertimbangkan efisiensi energi melalui optimasi diameter pipa. Namun, perlu ditambahkan komponen renewable energy dan smart water management untuk meningkatkan sustainability jangka panjang. Integrasi sensor monitoring dan SCADA system dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi kehilangan air.

Aspek resilience terhadap perubahan iklim juga perlu dipertimbangkan dalam implementasi. Variabilitas curah hujan dan kenaikan muka air laut di wilayah pesisir Sidoarjo

dapat mempengaruhi kualitas dan kuantitas sumber air. Sistem distribusi perlu dirancang dengan fleksibilitas untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi sumber air.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem jaringan distribusi air bersih dari Perumahan Aloha ke Jl. Raya S. Parman Sidoarjo memerlukan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan analisis demografi, proyeksi kebutuhan air, dan simulasi hidraulik. Proyeksi penduduk menggunakan metode aritmatika menghasilkan estimasi 54.753 jiwa pada tahun 2029 dengan kebutuhan air total 88,75 lt/detik. Simulasi hidraulik menggunakan WaterCAD v8 menunjukkan bahwa diameter pipa optimal adalah 300 mm dengan material PVC, yang mampu memberikan tekanan operasional 1,8-6,1 bar dan kecepatan aliran 1,26 m/s. Sistem ini terbukti mampu melayani kebutuhan air pada berbagai kondisi operasional dengan sisa tekan 2,0 bar pada junction terjauh, memenuhi standar pelayanan yang ditetapkan. Penelitian ini memberikan kontribusi metodologis dalam perencanaan sistem distribusi air bersih dan rekomendasi teknis yang dapat diimplementasikan untuk meningkatkan akses air bersih masyarakat di wilayah studi, sekaligus mendukung pencapaian target SDGs 2030 dalam penyediaan air bersih universal.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyanda, R., Mulki, G. Z., & Fitriani, M. I. (2018). Analisis kebutuhan air bersih domestik di Desa Penjajap Kecamatan Pemangkat Kabupaten Sambas. *PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 6(2).
- Aminuddin, A., Purnaini, R., & Utomo, K. P. (2023). Analisis kualitas air baku dan kebutuhan air bersih sebagai dasar perencanaan sistem pengolahan air bersih di Desa Sungai Rengas. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3). <https://doi.org/10.26418/jtllb.v11i3.68674>
- Damayanti, A., Mulki, G. Z., & Ayuningtyas, R. A. (2018). Analisis kebutuhan air bersih domestik di desa kedamin darat dan desa kedamin hilir. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, 2(1).
- Davis, K. (1965). The urbanization of the human population. *Scientific American*, 213(3), 40–53.
- Hartono, B., & Wibowo, A. (2020). Analisis performa sistem distribusi air bersih menggunakan simulasi WaterCAD pada kondisi operasional berbeda. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 11(2), 89–102.
- Koçyiğit, N., & Koçyiğit, O. (2016). Hydraulic modeling of a water distribution network in a tourism area with highly varying characteristics. *Procedia Engineering*, 162, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.094>
- Kusuma, A., Rahman, S., & Prasetyo, D. (2022). Pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap kebutuhan air bersih dalam perencanaan sistem distribusi. *Indonesian Journal of Water Resources Engineering*, 8(1), 15–28.
- Mutiara, I., Destania, H. R., & Baniva, R. (2023). Analisis kebutuhan air bersih di Desa Simpang Sari Kecamatan Lawang Wetan Kabupaten Musi Banyuasin. *Rang Teknik Journal*, 6(2). <https://doi.org/10.31869/rtj.v6i2.3853>
- Pahude, M. S. (2022). Analisis kebutuhan air bersih di Desa Santigi Kecamatan Tolitoli Utara Kabupaten Tolitoli. *Jurnal Inovasi Penelitian*, 3(2).

- Putra, W. B., Dewi, N. I. K., & Busono, T. (2020). Penyediaan air bersih sistem kolektif: Analisis kebutuhan air bersih domestik pada perumahan klaster. *Jurnal Arsitektur TERRACOTTA*, 1(2). <https://doi.org/10.26760/terracotta.v1i2.4018>
- Rahmatullah, F., & Susanto, H. (2019). Studi perencanaan jaringan distribusi air bersih menggunakan software EPANET dan WaterCAD. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 4(3), 167–180.
- Sari, N. M., & Pradana, I. G. (2021). Optimasi diameter pipa pada sistem distribusi air bersih menggunakan metode Hardy-Cross. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 25(2), 112–125.
- Susanto, A., Wijaya, K., & Nugroho, P. (2018). Evaluasi kehilangan air pada sistem distribusi PDAM di Indonesia: Studi kasus multi-kota. *Water Resources and Environmental Engineering*, 5(2), 78–91.
- Wijaya, S., Kartini, D., & Subandrio, A. (2020). Penggunaan WaterCAD untuk analisis sistem distribusi air bersih di Kota Malang. *Jurnal Teknik Pengairan*, 11(1), 45–58.
- Zaman, D., Gupta, A. K., Uddameri, V., Tiwari, M. K., Sen, D., & Srivastava, A. (2022). Exploring the key facets of leakage dynamics in water distribution networks: Experimental verification, hydraulic modeling, and sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133525>
- Zhou, X., Liu, S., & Sela, L. (2024). Online state estimation in water distribution systems via Extended Kalman Filtering. *Water Research*, 265, 122136. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122136>