

**ANALISIS JARINGAN PIPA DISTRIBUSI AIR BERSIH
PDAM WAY RILAU MENGGUNAKAN SOFTWARE EPANET 2.2
(Studi Kasus: *District Meter Area (DMA)* G26 Kelurahan Sukabumi,
Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung)**

(Skripsi)

Oleh

**MUHAMMAD AGUNG WIJDAN JALAL
NPM. 2115011062**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS JARINGAN PIPA DISTRIBUSI AIR BERSIH
PDAM WAY RILAU MENGGUNAKAN SOFTWARE EPANET 2.2
(Studi Kasus: *District Meter Area* (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi,
Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung)**

Oleh

MUHAMMAD AGUNG WIJDAN JALAL

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS JARINGAN PIPA DISTRIBUSI AIR BERSIH PDAM WAY RILAU MENGGUNAKAN SOFTWARE EPANET 2.2 (Studi Kasus: *District Meter Area (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi,* *Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung*)

Oleh

MUHAMMAD AGUNG WIJDAN JALAL

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, kebutuhan terhadap air bersih pun mengalami peningkatan yang signifikan. Hal ini menuntut Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) untuk mampu menyediakan layanan air bersih secara optimal dengan memperhatikan aspek kualitas, kuantitas, dan kesinambungan pasokan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung proyeksi kebutuhan air bersih PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi selama 20 tahun ke depan berdasarkan data pelanggan yang ada, serta menganalisis kecukupan kapasitas produksi hingga tahun 2044. Selain itu, penelitian ini juga mencakup simulasi dan evaluasi jaringan distribusi air bersih DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada kondisi eksisting tahun 2024 menggunakan Epanet versi 2.2. Metodologi yang diterapkan meliputi proyeksi pertumbuhan pelanggan dengan metode aritmatika, geometri, dan eksponensial, dilanjutkan perhitungan proyeksi kebutuhan air bersih, serta analisis dan evaluasi sistem jaringan pipa distribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan maksimum harian air bersih pada tahun 2044 mencapai 603.245 liter per hari (6,982 liter/detik), sementara kapasitas produksi eksisting sebesar 1.143.936 liter per hari (13,24 liter/detik) dinilai masih mencukupi hingga 20 tahun mendatang. Hasil analisis simulasi Epanet ditemukan beberapa masalah teknis pada jaringan, termasuk dua titik dengan tekanan di bawah standar (J372 dan J370), satu pipa dengan unit headloss tinggi (Pi356), serta 13 pipa dengan kecepatan aliran di bawah standar. Perbaikan dilakukan melalui penggantian diameter pipa dan penambahan head reservoir, yang hasil akhirnya menunjukkan sistem jaringan telah memenuhi standar pada kondisi jam normal dan jam puncak.

Kata kunci: *Epanet 2.2*, Kebutuhan Air, Jaringan Distribusi, Perpipaan, PDAM

ABSTRACT

ANALYSIS OF CLEAN WATER DISTRIBUTION PIPE NETWORK PDAM WAY RILAU USING *EPANET 2.2* SOFTWARE (Case Study: *District Meter Area (DMA) G26 Sukabumi Village, Sukabumi Sub-district, Bandar Lampung City*)

By

MUHAMMAD AGUNG WIJDAN JALAL

Along with the increasing population, the demand for clean water has also increased significantly. This requires Regional Drinking Water Companies (PDAMs) to be able to provide clean water services optimally by paying attention to aspects of quality, quantity, and continuity of supply. This study aims to calculate the projected clean water demand of PDAM Way Rilau in the service area of DMA G26 Kelurahan Sukabumi for the next 20 years based on existing customer data, and analyze the adequacy of production capacity until 2044. In addition, this research also includes simulation and evaluation of the water distribution network of DMA G26 Kelurahan Sukabumi under existing conditions in 2024 using Epanet version 2.2. The methodology applied includes projection of customer growth using arithmetic, geometric, and exponential methods, followed by calculation of projected water demand, and analysis and evaluation of the distribution pipe network system. The results showed that the maximum daily demand for clean water in 2044 reached 603,245 liters per day (6.982 liters/second), while the existing production capacity of 1,143,936 liters per day (13.24 liters/second) is considered sufficient for the next 20 years. The results of the Epanet simulation analysis found several technical problems in the network, including two points with substandard pressure (J372 and J370), one pipe with a high headloss unit (Pi356), and 13 pipes with substandard flow velocity. Improvements were made through the replacement of pipe diameters and the addition of reservoir heads, the end result of which showed that the network system had met the standards under normal and peak hour conditions.

Keywords: Epanet 2.2, Water Demand, Distribution Network, Piping, PDAM

Judul Skripsi

: **ANALISIS JARINGAN PIPA DISTRIBUSI AIR
BERSIH PDAM WAY RILAU MENGGUNAKAN
SOFTWARE EPANET 2.2 (Studi Kasus:
District Meter Area (DMA) G26 Kelurahan
Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota
Bandar Lampung)**

Nama Mahasiswa

: **Muhammad Agung Wijdan Jalal**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115011062

Program Studi

: S1 Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



1. Komisi Pembimbing

A blue ink signature of Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.

Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.

NIP 19670514 199303 1 002

A blue ink signature of Ir. Ashruri, S.T., M.T.

Ir. Ashruri, S.T., M.T.

NIP 19870216 201903 1 005

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

A blue ink signature of Sasana Putra, S.T., M.T.

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

A blue ink signature of Dr. Suyadi, S.T., M.T.

Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.**



Sekretaris

: **Ir. Ashruri, S.T., M.T.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Ir. H. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928/200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **15 Juli 2025**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Agung Wijdan Jalal

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115011062

Jurusan : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisis Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih PDAM
Way Rilau Menggunakan *Software Epanet 2.2*
(Studi Kasus: *District Meter Area (DMA) G26*
Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota
Bandar Lampung)

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan apabila kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil salinan atau telah dibuat oleh orang lain maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 24 Juli 2025
Penulis,



Muhammad Agung Wijdan Jalal

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Muhammad Agung Wijdan Jalal, lahir di Metro pada tanggal 30 Oktober 2002, sebagai anak kedua dari dua bersaudara yang lahir dari pasangan Bapak Drs. Madtoni, M.M. dan Ibu Dra. Muharowati. Penulis memulai pendidikan di SD YPI Ibnu Rusyd Kotabumi Selatan, Lampung Utara pada tahun 2009–2015. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan ke jenjang sekolah menengah pertama di SMPN 7 Kotabumi, Lampung Utara pada tahun 2015–2018 dan ke jenjang sekolah menengah atas MAN 1 Lampung Utara pada 2018–2021. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri dan terdaftar sebagai mahasiswa di Program Studi S1 Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil FT Universitas Lampung pada tahun 2021. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di beberapa organisasi seperti Anggota Staff Birohmah/FOSSI FT Unila periode 2021 dan Anggota Pengurus Departemen Media Informasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) FT Unila periode 2023. Selama perkuliahan, penulis pernah mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Penelitian/Riset Prof. Dr. Ir. Chatarina Niken DWSBU, M.T. yang berjudul “Perilaku Kolom Beton di Dermaga Kapal Nelayan untuk Inovasi Material Tahan Air Laut” periode 2024 dan penulis pernah menjadi Asisten Dosen Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil FT Unila untuk Praktikum Mata Kuliah Teknologi Bahan periode 2025.

Pada bulan Agustus–November tahun 2024 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) SPAM Kota Bandar Lampung sebagai bentuk pengembangan diri serta menerapkan ilmu yang telah didapat selama perkuliahan. Selain itu, pada bulan Januari tahun

2024 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Tri Mukti Jaya, Banjar Agung, Tulang Bawang selama 40 hari sebagai bentuk pengabdian mahasiswa terhadap Tri Dharma Perguruan Tinggi. Dalam pengambilan tugas akhir untuk skripsi, penulis melakukan penelitian dengan judul “Analisis Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih PDAM Way Rilau Menggunakan *Software Epanet 2.2* (Studi Kasus: *District Meter Area* (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung)”.

KATA INSPIRASI

“Demi waktu dhuha. Dan demi malam apabila telah sunyi (gelap). Tuhanmu tiada meninggalkan kamu dan tiada (pula) benci kepadamu.”

(Q.S. Adh-Dhuha : 1–3)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmu lah engkau berharap.”

(Q.S. Al-Insyirah : 6–8)

“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Q.S. Al-Baqarah : 286)

“Jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu, sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar.”

(Q.S. Al-Baqarah : 153)

PERSEMBAHAN

Dengan mengucap Alhamdulillah,
Puji dan syukur kepada Allah SWT yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang
atas segala rahmat dan karunia-Nya, selawat beserta salam senantiasa tercurahkan
kepada suri teladan Nabi Muhammad SAW, keluarga, beserta sahabatnya.
Kupersembahkan karya sederhana ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta

Terima kasih untuk Mama dan Papa yang selalu mencurahkan kasih sayang,
memanjatkan doa, memberikan pengorbanan, mendukung dan memotivasi tiada
henti, serta mengusahakan yang terbaik selama ini. Berkat itu semua Allah
meridai penulis sampai di titik ini.

Kakak Tersayang

Yang selalu memanjatkan doa serta memberikan semangat dan keceriaan kepada
penulis.

Keluarga Besar

Yang selalu memanjatkan doa serta senantiasa memberikan dukungan dan
motivasi untuk keberhasilan dan kesuksesan penulis.

Dosen Pembimbing dan Penguji

Terima Kasih untuk dosen pembimbing dan penguji yang telah berjasa senantiasa
meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran, dan ilmu yang berharga
kepada penulis.

Sahabat-Sahabatku

Yang selalu memberikan semangat, dukungan, dan bantuan kepada penulis selama
masa perkuliahan.

Almamater Tercinta, Universitas Lampung

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan judul “*Analisis Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih PDAM Way Rilau Menggunakan Software Epanet 2.2 (Studi Kasus: District Meter Area (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung)*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil di Universitas Lampung.

Skripsi ini dapat terwujud tidak lepas dari bimbingan, dukungan, saran, dan doa dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu, saran, dan ketersediaan waktu kepada penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Ir. Ashruri, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, dan ketersediaan waktu kepada penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Dr. Ir. Endro Prasetyo W., S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan evaluasi dan saran dalam proses penyelesaian skripsi ini.
4. Ibu Dr. Ir. Ika Kustiani, S.T., M.Eng.Sc., IPM., ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan banyak ilmu, bimbingan, arahan, bantuan, dan ketersediaan waktu selama masa perkuliahan.
5. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

6. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. Seluruh Dosen, Staff, dan Civitas Akademika Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.
9. Mama, Papa, Kak Puput, dan seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan kasih sayang, motivasi, semangat, dan dukungan serta selalu memanjatkan doa untuk kesuksesan penulis.
10. C4 Karura Team yang telah saling memberikan bantuan, dukungan, dan motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini.
11. Teman-teman KKN Desa Tri Mukti Jaya Tulang Bawang, Teman-teman KP Proyek SPAM Sukabumi Bandar Lampung, Adik-adik Kelompok 15 dan 16 Praktikum Teknologi Bahan, dan Teman-teman MBKM Riset Prof. Niken atas kebersamaan dan kenangan indah selama penulis menjalani masa Kuliah Kerja Nyata (KKN), Kerja Praktik (KP), Asisten Dosen (Asdos), dan Program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM).
12. Teman-teman rekan seperjuangan Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung Angkatan 2021.
13. Semua pihak yang telah membantu dan terlibat dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga informasi tambahan, saran, dan kritik untuk pengembangan lebih lanjut sangat penulis harapkan. Semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat.

Bandar Lampung, 24 Juli 2025

Penulis,

Muhammad Agung Wijdan Jalal

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	iv
--------------------	----

DAFTAR GAMBAR	viii
---------------------	------

I. PENDAHULUAN	1
----------------------	---

1.1. Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	5
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	7
1.6. Sistematika Penulisan Laporan.....	8

II. TINJAUAN PUSTAKA	10
----------------------------	----

2.1. Hasil Penelitian Terdahulu.....	10
2.2. Pengertian Air Bersih	17
2.3. Pengertian Air Minum	18
2.4. Instalasi Pengolahan Air Minum	19
2.5. Sumber Air Bersih	21
2.6. Persyaratan Penyediaan Air Bersih.....	26
2.6.1. Persyaratan Kualitatif.....	27
2.6.2. Persyaratan Kuantitas.....	31
2.6.3. Persyaratan Kontinuitas	33
2.7. Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih	34
2.7.1. Penyediaan Air Domestik	35
2.7.2. Penyediaan Air Non Domestik	37
2.8. Proyeksi Kebutuhan Air Bersih.....	40
2.9. Faktor yang Mempengaruhi Pemakaian Air Bersih.....	50
2.10. Fluktuasi Pemanfaatan Air.....	54
2.11. Distribusi Air Bersih	60
2.12. Dasar Hidrolika Perpipaan.....	67
2.13. Kehilangan Tekanan.....	70
2.13.1. Persamaan <i>Hazen Williams</i>	71
2.13.2. Persamaan <i>Darcy Weisbach</i>	73
2.13.3. Persamaan <i>De Chezy</i> dengan Koefisien <i>Manning</i>	74

2.14. Kehilangan Air	75
2.15. Hidrolika Jaringan Pipa	77
2.16. Kriteria Desain	84
2.17. Teori <i>Software Epanet</i>	86
2.17.1. Analisis Algoritma <i>Epanet</i>	89
2.17.2. Kalibrasi <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	94
2.17.3. Katup	95
2.18. Tahap Penggunaan <i>Epanet 2.2</i>	97
2.18.1. Analisis Jaringan Pipa Menggunakan <i>Software Epanet 2.2</i>	97
2.18.2. Langkah-Langkah Pengoperasian <i>Epanet 2.2</i>	99
III. METODOLOGI PENELITIAN	122
3.1. Jenis Penelitian	122
3.2. Objek dan Metodologi Penelitian	123
3.3. Waktu dan Lokasi Penelitian	123
3.4. Studi Pustaka	131
3.5. Teknik Pengumpulan Data	131
3.6. Analisa Data dan Pembahasan	132
3.7. Bagan Alir Penelitian	134
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	137
4.1. Tinjauan Umum Daerah Pelayanan	137
4.2. Data Hasil Penelitian	140
4.2.1. Data Penduduk Pelanggan PDAM Way Rilau untuk DMA G26	140
4.2.2. Data Teknis Perpipaan PDAM Way Rilau untuk DMA G26	141
4.3. Proyeksi Pertumbuhan Penduduk Pelanggan PDAM Way Rilau untuk DMA G26	146
4.4. Perhitungan Kebutuhan Air Bersih dan <i>Base Demand</i>	162
4.4.1. Kebutuhan Air Domestik	162
4.4.2. Kebutuhan Air Non Domestik	167
4.4.3. Kebutuhan Air Total	169
4.4.4. Kebocoran atau Kehilangan Air	170
4.4.5. Kebutuhan Air Rata-Rata	172
4.4.6. Kebutuhan Air Harian Maksimum	173
4.4.7. Kebutuhan Air Jam Puncak	175
4.4.8. Perhitungan <i>Base Demand</i>	180
4.5. Perbandingan Ketersediaan Air Bersih (Qsedia) dengan Kebutuhan Air Bersih (Qbutuh)	183
4.6. Simulasi Permodelan Jaringan Pipa Distribusi	189
4.6.1. Alur Proses <i>Software Epanet 2.2</i>	191
4.6.2. Analisis Kondisi Jaringan Pipa Distribusi Eksisting Tahun 2024	196
4.6.3. Kalibrasi Data Model Simulasi <i>Output</i> PDAM Way Rilau dengan Model Simulasi <i>Output</i> Penulis	217

4.6.4.	Evaluasi Kondisi Jaringan Pipa Distribusi Eksisting Tahun 2024	225
V.	PENUTUP	262
5.1.	Kesimpulan	262
5.2.	Saran	265
	DAFTAR PUSTAKA	267
	LAMPIRAN	272

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Kebutuhan Air Berdasarkan Kategori Kota	33
2.2. Konsumsi Air Bersih Domestik	35
2.3. Kebutuhan Air Non Domestik	38
2.4. Nilai Faktor Maksimum dan Faktor Puncak	57
2.5. Kekasaran Pipa pada Koefisien <i>Hazen-Williams</i>	73
2.6. Nilai Koefisien Kekasaran Pipa Menurut <i>Hazen-Williams</i>	82
2.7. Data <i>Input Epanet 2.2</i>	88
2.8. Data <i>Output Epanet 2.2</i>	89
4.1. Data Penduduk Pelanggan PDAM Way Rilau untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	141
4.2. Data Teknis Perpipaan (<i>Link</i>) PDAM Way Rilau untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	144
4.3. Data Teknis Perpipaan (<i>Node</i>) PDAM Way Rilau untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	146
4.4. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Setiap Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Aritmatika	148
4.5. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Setiap Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Geometri	150

4.6. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Setiap Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Eksponensial.....	152
4.7. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Semua Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Aritmatika.....	153
4.8. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Semua Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Geometri	155
4.9. Hasil Perhitungan Proyeksi Pelanggan 20 Tahun untuk Semua Area di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Eksponensial.....	157
4.10. Rekap Perhitungan Penduduk Pelanggan PDAM Way Rilau untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi 20 Tahun Mendatang	159
4.11. Kriteria Perencanaan Air Bersih	164
4.12. Hasil Proyeksi Pelanggan DMA G26 Tahun 2044	166
4.13. Perhitungan Kebutuhan Air Domestik DMA G26.....	166
4.14. Standar Kebutuhan Air Non Domestik	167
4.15. Perhitungan Kebutuhan Air Non Domestik DMA G26.....	169
4.16. Perhitungan Kebutuhan Air Total DMA G26.....	170
4.17. Perhitungan Kebocoran atau Kehilangan Air DMA G26	171
4.18. Perhitungan Kebutuhan Air Rata-Rata DMA G26	173
4.19. Perhitungan Kebutuhan Air Harian Maksimum DMA G26	174
4.20. Perhitungan Kebutuhan Air Jam Puncak DMA G26	176
4.21. Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Air Bersih di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Saat Ini (2024)	178
4.22. Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Air Bersih di DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi 20 Tahun Mendatang (2044)	179

4.23. Data Posisi <i>Node/Junction</i> dan <i>Base Demand</i> pada Jaringan Distribusi DMA G26 Kelurahan Sukabumi.....	180
4.24. Analisis <i>Demand Supply Ratio</i> di DMA G26 Kelurahan Sukabumi	185
4.25. Koefisien Kekasaran Pipa <i>Hazen-Williams</i>	197
4.26. Dimensi Pipa yang Ada di Pasaran	198
4.27. Faktor Pengali Kebutuhan Air Bersih DMA G26.....	200
4.28. Fluktuasi Pemakaian Air 24 Jam di DMA G26 Kelurahan Sukabumi	203
4.29. Hasil <i>Output Links</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software</i> <i>Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Normal (Eksisting)	205
4.30. Hasil <i>Output Nodes</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software</i> <i>Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Normal (Eksisting)	206
4.31. Hasil <i>Output Links</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software</i> <i>Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Puncak (Eksisting).....	207
4.32. Hasil <i>Output Nodes</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software</i> <i>Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Puncak (Eksisting).....	208
4.33. Kalibrasi Data antara Simulasi <i>Output</i> PDAM Way Rilau dengan Simulasi <i>Output</i> Penulis pada <i>Epanet 2.2 (Node/Junction)</i>	221
4.34. Kalibrasi Data antara Simulasi <i>Output</i> PDAM Way Rilau dengan Simulasi <i>Output</i> Penulis pada <i>Epanet 2.2 (Link/Pipe)</i>	222
4.35. Kriteria Desain Pipa Distribusi	226
4.36. <i>Node/Titik</i> dengan Tekanan (<i>Pressure</i>) di Bawah Kriteria Desain untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	235
4.37. <i>Link/Pipa</i> dengan <i>Unit Headloss</i> di Atas Kriteria Desain untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	235
4.38. <i>Link/Pipa</i> dengan Kecepatan (<i>Velocity</i>) di Bawah Kriteria Desain untuk DMA G26 Kelurahan Sukabumi	235

4.39. Hasil <i>Output Links</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Normal (Evaluasi)	241
4.40. Hasil <i>Output Nodes</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Normal (Evaluasi)	242
4.41. Hasil <i>Output Links</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Puncak (Evaluasi)	243
4.42. Hasil <i>Output Nodes</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software Epanet 2.2</i> Kondisi Jam Puncak (Evaluasi)	244
4.43. Diameter Pipa Sebelum dan Setelah Dievaluasi	258
4.44. <i>Head Reservoir</i> Sebelum dan Setelah Dievaluasi	259
4.45. Panjang Pipa Evaluasi yang Diameternya Diperkecil dan Diperbesar	261

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Cara Gravitasi.....	61
2.2. Cara Pemompaan.	62
2.3. Cara Gabungan.	63
2.4. Sistem Cabang.....	65
2.5. Sistem Melingkar (<i>Loop</i>).	66
2.6. Sistem Sistem <i>Grid Iron</i>	67
2.7. Debit Aliran dan Persamaan Kontinuitas.	68
2.8. Diagram Energi dan Garis Energi.	79
2.9. Logo <i>Epanet 2.2</i>	86
2.10. Menjalankan <i>Software Epanet 2.2</i>	100
2.11. Membuka Lembar Kerja.	101
2.12. File Gambar Untuk Peta Dasar.	102
2.13. Masukan Gambar Peta.	103
2.14. Memilih Tampilan.....	105
2.15. Menyamakan Ukuran Satuan.....	106

2.16. <i>Reservoir</i>	108
2.17. <i>Junction</i>	110
2.18. <i>Pipe</i>	112
2.19. Simulasi.	114
2.20. <i>Run</i>	115
2.21. <i>Error</i>	116
2.22. Laporan Status.....	117
2.23. Run Kembali.	118
2.24. Opsi Hasil Permodelan.....	120
2.25. Hasil Permodelan.	121
3.1. Peta Administrasi Kecamatan Sukabumi Kota Bandar Lampung.	125
3.2. Peta Lokasi Penelitian DMA G26 Kecamatan Sukabumi.....	126
3.3. Peta Lokasi Layanan Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) DMA G26.	127
3.4. <i>Layout</i> Jalur Pipa Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) SPAM Kota Bandar Lampung.	128
3.5. <i>Layout</i> Jalur Pipa Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) SPAM Kelurahan Sukabumi.....	129
3.6. <i>Layout</i> Jalur Pipa Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) DMA G26.	130
3.7. Bagan Alir (<i>Flow Chart</i>) Penelitian.....	136
4.1. Peta Daerah Layanan Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) DMA G26.	139

4.2. Grafik Proyeksi Pertumbuhan Pelanggan 20 Tahun DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Aritmatika.	154
4.3. Grafik Proyeksi Pertumbuhan Pelanggan 20 Tahun DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Geometri.	156
4.4. Grafik Proyeksi Pertumbuhan Pelanggan 20 Tahun DMA G26 Kelurahan Sukabumi Metode Eksponensial.	158
4.5. Grafik Proyeksi Pertumbuhan Pelanggan 20 Tahun DMA G26 Kelurahan Sukabumi Menggunakan 3 Metode.	161
4.6. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 253).....	182
4.7. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 253).	182
4.8. Contoh Rumah yang Terpasang SR (<i>Junction</i> 253).....	183
4.9. Skematik Kapasitas Produksi/Ketersediaan Air Bersih di DMA G26 Kelurahan Sukabumi.....	188
4.10. Skema Visualisasi Jaringan Pipa Distribusi DMA G26 Kelurahan Sukabumi pada <i>Software Epanet</i> 2.2.	195
4.11. Menu <i>Time Pattern</i> untuk Analisis Jam Puncak pada <i>Software</i> <i>Epanet</i> 2.2.	201
4.12. Grafik Fluktuasi Pemakaian Air 24 Jam di DMA G26 Kelurahan Sukabumi.	202
4.13. <i>Demand</i> dan <i>Flow</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Eksisting) pada <i>Software Epanet</i> 2.2.	209
4.14. <i>Head</i> dan <i>Velocity</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Eksisting) pada <i>Software Epanet</i> 2.2.	210
4.15. <i>Pressure</i> dan <i>Unit Headloss</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Eksisting) pada <i>Software Epanet</i> 2.2.....	211
4.16. <i>Demand</i> dan <i>Flow</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Eksisting) pada <i>Software Epanet</i> 2.2.....	212

4.17. <i>Demand</i> dan <i>Flow</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Eksisting) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	213
4.18. <i>Pressure</i> dan <i>Unit Headloss</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Eksisting) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	214
4.19. Hasil Kalibrasi Data <i>Demand</i> pada <i>Epanet 2.2</i>	223
4.20. Hasil Kalibrasi Data <i>Head</i> pada <i>Epanet 2.2</i>	223
4.21. Hasil Kalibrasi Data <i>Pressure</i> pada <i>Epanet 2.2</i>	224
4.22. Hasil Kalibrasi Data <i>Flow</i> pada <i>Epanet 2.2</i>	224
4.23. Hasil Kalibrasi Data <i>Velocity</i> pada <i>Epanet 2.2</i>	225
4.24. Grafik Tekanan (<i>Pressure</i>) Tiap <i>Node/Junction</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	228
4.25. Grafik Tekanan (<i>Pressure</i>) Tiap <i>Node/Junction</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	229
4.26. Grafik <i>Unit Headloss</i> Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	230
4.27. Grafik <i>Unit Headloss</i> Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	231
4.28. Grafik Kecepatan (<i>Velocity</i>) Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	232
4.29. Grafik Kecepatan (<i>Velocity</i>) Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Eksisting).	233
4.30. <i>Demand</i> dan <i>Flow</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	245
4.31. <i>Head</i> dan <i>Velocity</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	246

4.32. <i>Pressure</i> dan <i>Unit Headloss</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Normal (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	247
4.33. <i>Demand</i> dan <i>Flow</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	248
4.34. <i>Head</i> dan <i>Velocity</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	249
4.35. <i>Pressure</i> dan <i>Unit Headloss</i> DMA G26 Kelurahan Sukabumi Kondisi Jam Puncak (Evaluasi) pada <i>Software Epanet 2.2</i>	250
4.36. Grafik Tekanan (<i>Pressure</i>) Tiap <i>Node/Junction</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	251
4.37. Grafik Tekanan (<i>Pressure</i>) Tiap <i>Node/Junction</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	252
4.38. Grafik <i>Unit Headloss</i> Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	253
4.39. Grafik <i>Unit Headloss</i> Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	254
4.40. Grafik Kecepatan (<i>Velocity</i>) Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Normal Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	255
4.41. Grafik Kecepatan (<i>Velocity</i>) Tiap <i>Link/Pipe</i> pada Jam Puncak Dibandingkan dengan Kriteria Desain (Evaluasi).	256
4.42. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Reservoir 1</i>).....	273
4.43. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Reservoir 1</i>).....	273
4.44. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction 252</i>).....	274
4.45. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction 252</i>).	274
4.46. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction 354</i>).....	275
4.47. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction 354</i>).	275

4.48. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 355).....	276
4.49. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 355).	276
4.50. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 356).....	277
4.51. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 356).	277
4.52. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 357).....	278
4.53. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 357).	278
4.54. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 358).....	279
4.55. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 358).	279
4.56. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 359).....	280
4.57. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 359).	280
4.58. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 360).....	281
4.59. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 360).	281
4.60. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 361).....	282
4.61. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 361).	282
4.62. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 362).....	283
4.63. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 362).	283
4.64. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 363).....	284
4.65. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 363).	284
4.66. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 364).....	285
4.67. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 364).	285

4.68. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 365).....	286
4.69. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 365).	286
4.70. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 366).....	287
4.71. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 366).	287
4.72. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 367).....	288
4.73. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 367).	288
4.74. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 368).....	289
4.75. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 368).	289
4.76. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 369).....	290
4.77. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 369).	290
4.78. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 370).....	291
4.79. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 370).	291
4.80. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 371).....	292
4.81. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 371).	292
4.82. Survei Posisi <i>Node</i> dan Jumlah SR (<i>Junction</i> 372).....	293
4.83. Letak Posisi <i>Node</i> pada <i>Gmaps</i> (<i>Junction</i> 372).	293

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, kebutuhan terhadap air sebagai sumber daya esensial bagi keberlangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya turut mengalami peningkatan yang signifikan (Ekawati, 2007). Permintaan akan air bersih ini tidak selalu diimbangi oleh ketersediaan pasokan air yang memadai, baik dari sumber air permukaan, air hujan, maupun air tanah. Kesenjangan antara kebutuhan dan ketersediaan air bersih tersebut sebagian besar disebabkan oleh kurang optimalnya pengelolaan dan pembangunan infrastruktur di sektor sumber daya air. Hal ini mencakup tidak hanya pembangunan fisik, tetapi juga perhatian terhadap keberlanjutan sumber air dan potensi daya air yang tersedia. Di samping itu, dinamika pembangunan yang pesat serta perubahan fungsi lahan yang tidak terkontrol seringkali mengabaikan aspek kelestarian lingkungan dan keseimbangan ekosistem air, sehingga memperburuk kondisi ketersediaan air di wilayah tertentu (Hasibuan, 2013).

Kota Bandar Lampung, yang terletak di Provinsi Lampung, mencakup wilayah daratan seluas 183,77 km² dan secara administratif terbagi menjadi 20 kecamatan dan 126 kelurahan. Sebagai ibu kota provinsi, kota ini telah ditetapkan sebagai salah satu Pusat Kegiatan Nasional (PKN) dengan berbagai fungsi strategis, termasuk sebagai pusat pemerintahan tingkat provinsi, pusat perdagangan dan jasa berskala regional, pusat logistik distribusi dan koleksi barang, serta sebagai kawasan pendukung sektor

pariwisata dan pendidikan tinggi. Pertumbuhan penduduk di Kota Bandar Lampung menunjukkan tren peningkatan setiap tahunnya. Data terbaru mencatat bahwa jumlah penduduk kota ini mencapai 1.100.109 jiwa pada tahun 2023, dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 0,655% per tahun dalam kurun waktu 2021 hingga 2024 (Kota Bandar Lampung Dalam Angka 2024, 2024). Dengan jumlah penduduk yang besar dan kepadatan aktivitas sosial-ekonomi yang tinggi, Kota Bandar Lampung diklasifikasikan sebagai kota metropolitan yang memerlukan suplai air bersih dalam jumlah besar untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga, industri, dan layanan publik.

Pemenuhan kebutuhan akan air bersih merupakan salah satu prioritas utama dalam pembangunan infrastruktur dasar di Kota Bandar Lampung. Untuk mendukung pemenuhan kebutuhan tersebut, pemerintah setempat secara aktif melakukan berbagai upaya guna menjamin ketersediaan air bersih yang dapat diakses secara merata oleh masyarakat, baik dari segi ketersediaan pasokan, keterjangkauan harga, maupun kestabilan distribusinya. Salah satu langkah konkret yang ditempuh adalah pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) sebagai sarana strategis dalam penyediaan air bersih secara terstruktur dan berkelanjutan. Di Kota Bandar Lampung, pengelolaan SPAM dilaksanakan oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Way Rilau, yang merupakan badan usaha milik daerah dengan mandat untuk mengelola dan mengoperasikan infrastruktur penyediaan air bersih. Tujuan utamanya adalah memberikan layanan air bersih secara merata, berkelanjutan, dan berkeadilan kepada seluruh lapisan masyarakat. Sistem SPAM yang dikelola PDAM Way Rilau saat ini mencakup delapan kecamatan, yakni Rajabasa, Sukabumi, Way Halim, Sukarame, Kedaton, Tanjung Senang, Labuhan Ratu, dan Kedamaian. Dalam konteks penelitian ini, fokus wilayah kajian ditujukan pada Kecamatan Sukabumi, khususnya di Kelurahan Sukabumi yang termasuk dalam daerah pelayanan DMA G26. Wilayah ini mendapatkan suplai air bersih dari *reservoir* distribusi yang berada di Rajabasa, yang berfungsi sebagai sumber utama pendistribusian air ke wilayah tersebut.

Salah satu permasalahan utama yang sering dihadapi dalam sistem jaringan distribusi air bersih PDAM Way Rilau adalah ketidakaturan tekanan air di berbagai titik layanan serta tingginya tingkat kehilangan air atau *Non-Revenue Water* (NRW). Kondisi ini menyebabkan kerugian finansial yang cukup signifikan bagi perusahaan, karena air yang tidak sampai ke konsumen tidak dapat ditagihkan meskipun telah melalui proses produksi dan distribusi. Permasalahan ini tidak hanya terjadi di beberapa zona, melainkan hampir merata di seluruh wilayah pelayanan PDAM Way Rilau, termasuk di wilayah *District Meter Area* (DMA) G26 yang berada di Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi. DMA G26 merupakan salah satu area pelayanan dengan sistem distribusi gravitasi dan memiliki jumlah pelanggan terbesar di kelurahan tersebut. Saat ini, jumlah penduduk dalam cakupan DMA G26 tercatat sebanyak 2.792 jiwa, yang tersebar dalam 10 sub-area. Mengingat besarnya beban layanan dan kompleksitas permasalahan di kawasan ini, maka diperlukan suatu pendekatan teknis untuk mengevaluasi kinerja sistem perpipaan yang digunakan. Salah satu langkah strategis yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan analisis menyeluruh terhadap kondisi jaringan pipa, untuk menentukan apakah pipa yang ada masih layak pakai, memerlukan perbaikan, atau sudah saatnya diganti secara keseluruhan. Analisis ini penting sebagai bentuk deteksi dini terhadap permasalahan teknis distribusi air, karena spesifikasi dan kondisi pipa sangat memengaruhi efisiensi penyaluran air bersih. Untuk mendukung proses analisis tersebut, saat ini tersedia berbagai perangkat lunak yang dapat digunakan untuk simulasi hidrolis jaringan pipa, seperti *Software Epanet* dan *WaterCAD*. Dalam konteks penelitian ini, digunakan *Epanet 2.2*, yang dikenal memiliki antarmuka sederhana, mudah dipelajari bagi pemula, namun tetap menyediakan fitur yang memadai untuk pemodelan dasar sistem distribusi air.

Pertumbuhan jumlah penduduk yang terus meningkat, disertai dengan perluasan bertahap pada jalur distribusi air, secara langsung memengaruhi kapasitas infrastruktur tampungan dalam memenuhi kebutuhan pasokan air

di wilayah pelayanan. Seiring meningkatnya permintaan air bersih serta potensi bertambahnya cakupan wilayah layanan di masa mendatang, diperlukan evaluasi yang komprehensif terhadap proyeksi kebutuhan air bersih, khususnya di Kecamatan Sukabumi, tepatnya di Kelurahan Sukabumi dalam cakupan wilayah *District Meter Area* (DMA) G26. Evaluasi ini menjadi penting untuk memastikan bahwa sistem distribusi air dapat beroperasi secara optimal hingga tahun 2044. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dan dituangkan dalam bentuk skripsi yang berjudul “Analisis Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih PDAM Way Rilau Menggunakan *Software Epanet 2.2* (Studi Kasus: *District Meter Area* (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung)”. Melalui studi ini, diharapkan dapat diperoleh alternatif solusi yang efektif dalam perencanaan dan pengelolaan distribusi air bersih pada wilayah kajian, sehingga dapat mendukung keberlanjutan pelayanan air bersih dalam jangka panjang.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang dan identifikasi permasalahan yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa besar proyeksi kebutuhan total air bersih masyarakat yang menjadi pelanggan PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, mulai tahun 2024 hingga dua puluh tahun ke depan?
2. Bagaimana perbandingan antara kebutuhan air bersih masyarakat dengan kapasitas ketersediaan air bersih dari PDAM Way Rilau dalam kurun waktu tahun 2024 hingga dua puluh tahun mendatang di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi?
3. Seperti apa kondisi pemodelan jaringan distribusi perpipaan milik PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi,

Kecamatan Sukabumi, berdasarkan simulasi menggunakan *Software Epanet 2.2* untuk tahun 2024?

4. Apa hasil evaluasi terhadap kinerja jaringan distribusi air bersih PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, untuk tahun 2024, ditinjau dari permasalahan teknis yang telah diidentifikasi?

1.3. Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian ini tetap terarah dan tidak terlalu meluas dari rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini secara geografis dibatasi hanya pada wilayah pelayanan PDAM Way Rilau yang berada di *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung.
2. Analisis kebutuhan air bersih dilakukan untuk proyeksi waktu mulai dari tahun 2024 hingga 20 tahun ke depan, khusus untuk pelanggan PDAM di wilayah pelayanan DMA G26.
3. Proyeksi jumlah penduduk pelanggan di wilayah penelitian dihitung menggunakan tiga metode perhitungan pertumbuhan penduduk, yaitu metode aritmatika, metode geometri, dan metode eksponensial.
4. Penelitian ini mencakup perbandingan antara kebutuhan air bersih masyarakat ($Q_{kebutuhan}$) dengan kapasitas ketersediaan air bersih eksisting ($Q_{tersedia}$).
5. Kajian ini tidak mencakup penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) maupun *Detail Engineering Design* (DED).
6. Jenis data yang digunakan meliputi peta eksisting wilayah DMA G26, data jaringan pipa, data kapasitas produksi PDAM Way Rilau tahun 2024, data kebutuhan air bersih berdasarkan zonasi atau jenis area, serta data kependudukan yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS), kelurahan, atau instansi terkait.

7. Proyeksi pertumbuhan penduduk pelanggan hingga 20 tahun ke depan didasarkan pada data kependudukan tahun 2024 yang diperoleh dari sumber resmi seperti BPS dan kelurahan setempat.
8. Fokus analisis jaringan distribusi perpipaan dalam penelitian ini terbatas pada kondisi eksisting tahun 2024 di wilayah DMA G26, Kelurahan Sukabumi.
9. Simulasi dan pemodelan sistem jaringan distribusi air dilakukan menggunakan *Software Epanet 2.2*, dengan lingkup terbatas pada wilayah penelitian.
10. Kriteria teknis desain jaringan perpipaan mengacu pada ketentuan (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007), yaitu tekanan air berkisar antara 5,16–80 meter, *headloss* antara 0–10 meter per kilometer, dan kecepatan aliran air sebesar 0,3–4,5 meter per detik.
11. Analisis jaringan perpipaan dilakukan dalam dua kondisi operasional, yakni saat jam normal dan saat jam puncak (*time pattern*).
12. Penelitian ini tidak mencakup pembahasan terkait aspek finansial maupun kualitas fisik dan kimia air bersih dalam sistem distribusi PDAM.
13. Diasumsikan bahwa seluruh penduduk di wilayah penelitian merupakan pelanggan PDAM Way Rilau yang mengandalkan layanan PDAM sebagai satu-satunya sumber air bersih.
14. Istilah "air bersih" dalam konteks penelitian ini digunakan untuk menggambarkan air yang digunakan dalam berbagai aspek kebutuhan hidup masyarakat, bukan terbatas pada air minum saja.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengestimasi total kebutuhan air bersih masyarakat pelanggan PDAM

Way Rilau di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, mulai tahun 2024 hingga proyeksi 20 tahun ke depan.

2. Menganalisis kesesuaian antara kebutuhan dan ketersediaan air bersih di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, dengan membandingkan kapasitas pasokan PDAM Way Rilau terhadap proyeksi kebutuhan masyarakat dari tahun 2024 hingga 20 tahun mendatang.
3. Melakukan simulasi model jaringan distribusi air bersih di wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi untuk kondisi eksisting tahun 2024, menggunakan *Software Epanet 2.2* sebagai alat bantu pemodelan hidrolis.
4. Mengevaluasi kinerja jaringan distribusi air bersih PDAM Way Rilau pada wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi untuk tahun 2024, berdasarkan permasalahan teknis yang telah diidentifikasi dalam sistem distribusi yang ada.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi yang komprehensif mengenai kondisi ketersediaan air bersih oleh PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, baik untuk kondisi eksisting tahun 2024 maupun proyeksi hingga 20 tahun mendatang.
2. Menyediakan referensi analitis terkait evaluasi jaringan distribusi perpipaan sistem penyediaan air bersih pada wilayah pelayanan PDAM Way Rilau, yang dapat dijadikan dasar dalam perencanaan maupun pengembangan sistem distribusi air di masa depan.
3. Menjadi sumber pembelajaran dan literatur ilmiah yang bermanfaat bagi

mahasiswa, khususnya di lingkungan Universitas Lampung, yang tertarik mendalami bidang teknik lingkungan, manajemen sumber daya air, atau sistem jaringan perpipaan.

4. Memberikan kontribusi praktis sebagai bahan pertimbangan bagi pihak PDAM Way Rilau dalam merumuskan strategi teknis untuk mengatasi permasalahan jaringan distribusi air, khususnya pada wilayah pelayanan DMA G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi.

1.6. Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika dalam penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat uraian mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan yang menjadi kerangka awal dalam menyusun laporan penelitian secara terstruktur.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang mendasari penelitian, yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah relevan. Selain itu, dalam bab ini juga disajikan kajian pustaka yang berkaitan dengan penelitian sebelumnya dan dapat dijadikan sebagai acuan dalam mendukung pelaksanaan studi ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci mengenai jenis penelitian yang digunakan, lokasi penelitian, metode pengumpulan data, teknik analisis data, serta alur pelaksanaan penelitian yang digambarkan dalam bentuk bagan alir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil yang diperoleh dari proses penelitian serta pembahasan mendalam terhadap data dan temuan yang telah dianalisis, guna

menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya.

BAB V PENUTUP

Bab terakhir ini memuat kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang dapat dijadikan masukan untuk pengembangan penelitian lanjutan maupun sebagai rekomendasi bagi pihak terkait.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini mencantumkan seluruh referensi yang digunakan dalam penyusunan skripsi, baik berupa buku, jurnal, peraturan, maupun dokumen resmi lainnya yang relevan dengan topik penelitian.

LAMPIRAN

Memuat dokumen pendukung, data tambahan, peta, hasil perhitungan, dan berbagai informasi lainnya yang menunjang kelengkapan dan validitas penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya memiliki peran penting dalam memberikan landasan teoritis maupun metodologis bagi penelitian yang sedang dikembangkan. Studi terdahulu dapat dijadikan sebagai acuan atau referensi untuk memperkuat argumen, memperluas sudut pandang analisis, serta menjadi pembanding dalam mengkaji perbedaan konteks, pendekatan, maupun hasil temuan. Selain itu, tinjauan terhadap penelitian sebelumnya memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi kesenjangan (*gap*) penelitian, serta merumuskan kontribusi baru yang dapat ditawarkan oleh studi saat ini. Dengan menjadikan penelitian terdahulu sebagai pijakan, proses penyusunan kerangka berpikir dan metodologi penelitian menjadi lebih terarah dan valid secara akademik. Adapun beberapa penelitian relevan yang dijadikan referensi dalam penelitian ini akan dipaparkan sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan oleh (Yahya et al., 2021) berfokus pada evaluasi sistem jaringan perpipaan dalam rangka optimalisasi penyediaan air bersih di *Reservoir* Jan 1 yang dikelola oleh PDAM Kota Ternate. Studi ini bertujuan untuk menganalisis potensi kelebihan maupun kekurangan suplai air pada tahun 2030, serta menilai efisiensi sistem distribusi yang ada dengan menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu simulasi hidraulik. Salah satu tahapan penting dalam penelitian ini adalah proses kalibrasi tekanan, yaitu membandingkan data tekanan aktual di lapangan dengan hasil simulasi untuk mengukur tingkat

akurasi model. Selain itu, dilakukan pula proyeksi jumlah penduduk guna memperkirakan kebutuhan air bersih di masa depan dan mengidentifikasi potensi terjadinya surplus maupun defisit pasokan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada tahun 2030 diprediksi akan terjadi defisit neraca air, sehingga dibutuhkan peningkatan kapasitas distribusi sebesar 4,25 liter per detik. Berdasarkan evaluasi teknis, disarankan adanya penggantian pipa ke diameter yang lebih kecil untuk mempercepat laju aliran, serta pemasangan tangki air tambahan sebagai solusi untuk meningkatkan kecepatan aliran dan sekaligus menurunkan tekanan hidraulik yang berlebihan dalam sistem.

2. Penelitian yang dilakukan oleh (Sari, 2021) bertujuan untuk mengevaluasi sistem jaringan distribusi air minum di Kecamatan Girsang Sipangan Bolon, Kabupaten Simalungun, dengan memanfaatkan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu analisis hidraulik. Fokus utama dari studi ini adalah untuk menentukan parameter-parameter penting dalam sistem perpipaan, khususnya tekanan dan kecepatan aliran air, serta untuk menghitung kebutuhan air minum yang diproyeksikan berdasarkan pertumbuhan penduduk hingga tahun 2025. Metode yang digunakan mencakup pendekatan aritmatika untuk proyeksi populasi, yang kemudian diintegrasikan ke dalam simulasi hidraulika melalui *Epanet 2.2* guna mendapatkan gambaran performa sistem distribusi secara menyeluruh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total debit air minum yang dapat disuplai ke wilayah layanan mencapai 15,86 liter per detik. Laju aliran ini telah memenuhi standar kelayakan sistem perpipaan. Namun demikian, ditemukan bahwa nilai tekanan pada sejumlah segmen jaringan cenderung tinggi, yang disebabkan oleh perbedaan elevasi muka tanah di area pelayanan. Kondisi ini menandakan perlunya perhatian lebih dalam pengelolaan tekanan untuk mencegah potensi kerusakan jaringan maupun gangguan layanan distribusi air.

3. (Talanipa et al., 2022) melakukan kajian evaluatif terhadap sistem jaringan perpipaan PDAM di wilayah Kolaka dengan memanfaatkan *Software Epanet* versi 2.2. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis efisiensi distribusi air bersih serta memproyeksikan kebutuhan air masyarakat di Kecamatan Latambaga dan Kelurahan Sakuli pada dua titik waktu, yaitu tahun 2021 dan tahun 2030. Dalam pelaksanaannya, *Epanet* 2.2 digunakan sebagai alat simulasi untuk memodelkan sistem distribusi, sedangkan proyeksi jumlah penduduk dihitung menggunakan pendekatan metode eksponensial, guna memperkirakan peningkatan permintaan air bersih di masa mendatang. Hasil penelitian menunjukkan adanya kenaikan kebutuhan air, dari 2,476 liter per detik pada tahun 2021 menjadi 2,875 liter per detik pada tahun 2030, mencerminkan pertumbuhan permintaan seiring peningkatan jumlah penduduk. Dari hasil evaluasi terhadap desain jaringan pipa yang ada, ditemukan bahwa sistem distribusi menggunakan variasi diameter pipa, yakni Ø 4", Ø 3", Ø 2", Ø 1½", dan Ø 1". Informasi ini menjadi penting dalam perencanaan teknis untuk menjamin kecukupan dan efisiensi sistem distribusi air bersih di wilayah studi.

4. (Ghazy Aflah et al., 2022) melakukan penelitian mengenai perencanaan sistem jaringan perpipaan untuk kawasan perumahan yang sedang dalam tahap pengembangan di Desa Logandeng, Kabupaten Gunung Kidul. Studi ini bertujuan untuk menghitung kebutuhan debit air bersih yang diperlukan di wilayah tersebut serta merancang jaringan distribusinya dengan menggunakan pendekatan teknis melalui *Software Epanet* versi 2.2. Dalam proses analisis, pemodelan distribusi air dilakukan dengan *Epanet*, sementara proyeksi jumlah penduduk sebagai dasar estimasi kebutuhan air dihitung menggunakan metode *least square*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan debit air bersih untuk kawasan perumahan mencapai 1,118 liter per detik, dan sistem distribusi dirancang berbasis aliran gravitasi. Evaluasi pada kondisi jam puncak menunjukkan bahwa pipa nomor 1 memiliki kecepatan aliran tertinggi

sebesar 1,89 meter per detik, sedangkan pipa nomor 15 menunjukkan kecepatan paling rendah, yakni sebesar 0,09 meter per detik. Dari sisi debit, pipa nomor 1 juga mencatat laju aliran tertinggi sebesar 14,86 liter per detik, sementara debit terendah terjadi pada pipa nomor 15 dengan nilai sebesar 0,69 liter per detik. Temuan ini memberikan gambaran rinci mengenai variasi hidraulik dalam sistem dan menjadi dasar penting dalam perencanaan jaringan perpipaan yang efisien dan berkelanjutan.

5. (Meicahayanti et al., 2021) melakukan penelitian yang berfokus pada evaluasi sistem jaringan perpipaan air bersih di kawasan *District Meter Area* (DMA) Loa Buah, Kota Samarinda. Tujuan utama dari studi ini adalah untuk menilai kondisi eksisting jaringan distribusi air bersih di wilayah tersebut, serta mengidentifikasi potensi permasalahan teknis yang terjadi. Dalam proses analisis, digunakan metode *Hardy Cross* untuk memodelkan sistem jaringan perpipaan, dengan dukungan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu simulasi hidraulik. Hasil penelitian menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara hasil simulasi komputer dengan data pengukuran aktual di lapangan, yang menandakan perlunya tindakan teknis lanjutan. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem distribusi air bersih di wilayah DMA Loa Buah masih perlu ditingkatkan, sebagaimana diamanatkan dalam (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007). Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan sejumlah strategi teknis, antara lain penggantian pipa yang telah ada, penambahan unit pompa, serta penyesuaian diameter dan posisi *valve* pada jaringan pipa yang ada guna meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem distribusi secara keseluruhan.
6. (Immanuel, 2014) melakukan studi analitis terhadap sistem jaringan perpipaan di PDAM Tirta Bulian, Kota Tebing Tinggi, dengan fokus pada analisis kebutuhan air di kawasan Perumahan Griya Prima Tebing

Tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung volume kebutuhan air harian serta membandingkan hasil perhitungan manual menggunakan metode *Hardy Cross* dengan hasil simulasi hidraulik yang dihasilkan melalui *Software Epanet* versi 2.2. Pendekatan metodologis yang diterapkan mencakup analisis komparatif antara kedua metode tersebut guna mengukur tingkat akurasi dan keandalan masing-masing dalam pemodelan sistem distribusi air. Berdasarkan hasil kajian, diketahui bahwa kebutuhan air total di kawasan perumahan tersebut mencapai 330 meter kubik per hari, dengan debit maksimum yang dibutuhkan sebesar 0,012963 meter kubik per detik. Sistem distribusi air dirancang menggunakan pipa galvanis dengan diameter 50 mm dan 75 mm. Dari perbandingan antara metode *Hardy Cross* dan simulasi *Epanet* 2.2, ditemukan bahwa hasil perhitungan manual cukup mendekati hasil simulasi digital, yang mengindikasikan bahwa metode konvensional masih relevan dan dapat digunakan sebagai alat bantu analisis alternatif dalam kondisi tertentu.

7. (Laksana, 2021) melakukan penelitian evaluatif terhadap sistem jaringan perpipaan distribusi air bersih di Kecamatan Kwadungan, Kabupaten Ngawi, dengan menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat simulasi utama. Tujuan utama dari studi ini adalah untuk menentukan besar kehilangan energi (*headloss*) mayor maupun minor dalam jaringan perpipaan, sebagai dasar untuk menilai efisiensi sistem distribusi yang ada. Analisis dilakukan dengan menggabungkan metode hidrolika *Darcy-Weisbach* dan metode *Hardy Cross* untuk memodelkan aliran dalam jaringan serta menghitung *headloss* yang terjadi. Berdasarkan hasil simulasi, nilai *headloss* mayor diperoleh sebesar 0,05428 meter, sementara *headloss* minor mencapai 0,4601 meter. Namun, ditemukan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pemodelan melalui *Epanet* dengan data pengukuran aktual di lapangan. Perbedaan ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara kondisi simulasi dan realitas sistem di lapangan. Selain itu, kecepatan aliran yang dihasilkan

dari simulasi berada di bawah batas standar teknis yang dipersyaratkan, sehingga dinilai belum layak untuk pengembangan jaringan lebih lanjut di wilayah tersebut. Temuan ini menegaskan pentingnya evaluasi teknis secara menyeluruh sebelum implementasi pengembangan sistem distribusi air bersih.

8. (Lisha et al., 2022) melakukan studi mengenai analisis sistem distribusi air bersih pada Unit Pelayanan Lumpo, PDAM Tirta Langkisau, dengan menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu pemodelan hidraulik. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh rendahnya tingkat efektivitas pendistribusian air bersih melalui jaringan perpipaan yang ada, sehingga diperlukan evaluasi menyeluruh terhadap sistem eksisting. Metode yang digunakan dalam kajian ini mencakup perhitungan kebutuhan air bersih tahun 2021 sebagai dasar evaluasi kinerja pelayanan, serta proyeksi kebutuhan air bersih selama lima tahun ke depan. Selain itu, dilakukan analisis terhadap tekanan dan kecepatan aliran air untuk menilai kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan masyarakat. Berdasarkan hasil analisis, diketahui bahwa pada tahun 2025 dengan asumsi jumlah penduduk mencapai 10.694 jiwa dan cakupan pelayanan sebesar 100%, kebutuhan air bersih mencapai 28,23 liter per detik, sedangkan pada kondisi jam puncak kebutuhan meningkat hingga 42,34 liter per detik. Hal ini menunjukkan adanya indikasi kehilangan air dalam sistem distribusi. Perbedaan mendasar antara penelitian yang dilakukan oleh Lisha dan kolega dengan studi ini adalah bahwa mereka tidak mengevaluasi proyeksi tingkat kehilangan air dalam rentang lima tahun ke depan, yang justru menjadi salah satu fokus penting dalam penelitian ini.
9. (Riduan et al., 2017) melaksanakan penelitian yang berfokus pada evaluasi tekanan dalam jaringan distribusi air bersih pada Zona Air Minum Prima (ZAMP) milik PDAM Intan Banjar, dengan memanfaatkan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu pemodelan

hidraulik. Studi ini dilatarbelakangi oleh permasalahan kebocoran pipa yang terjadi di sejumlah titik, yang diduga kuat disebabkan oleh rendahnya tekanan air pada beberapa lokasi pemantauan dalam sistem ZAMP. Untuk mengkaji kondisi tersebut, dilakukan pemodelan jaringan distribusi guna mensimulasikan variasi tekanan selama periode operasional 24 jam. Hasil analisis menunjukkan bahwa rentang tekanan dalam jaringan berkisar antara 36,4 meter hingga serendah 2,8 meter. Temuan ini menunjukkan adanya kondisi tekanan yang berada di bawah ambang batas minimum, yaitu 10 meter, yang mengindikasikan bahwa sistem distribusi dalam keadaan tidak aman. Ketidakstabilan tekanan ini berpotensi menyebabkan gangguan distribusi dan memperbesar risiko kehilangan air melalui kebocoran, sehingga diperlukan intervensi teknis untuk menjamin kestabilan dan keandalan sistem distribusi air bersih di wilayah tersebut.

10. (Barikiyah et al., 2023) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi sistem jaringan distribusi air minum milik PDAM Kota Mojokerto, khususnya pada Instalasi Pengolahan Air (IPA) Wates yang berada di bawah Zona Pelayanan Pengolahan Air Prajurit Kulon. Studi ini didasari oleh permasalahan krusial terkait tidak terpenuhinya kebutuhan air bersih masyarakat di wilayah pelayanan, yang disebabkan oleh debit aliran air yang tidak mencukupi akibat tingginya tingkat kehilangan air dalam sistem distribusi. Untuk mengkaji kondisi tersebut, peneliti menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 guna memodelkan jaringan distribusi dan menganalisis performa sistem secara hidraulik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kehilangan air di jaringan distribusi mencapai 35,2%. Angka ini menandakan adanya inefisiensi yang signifikan dalam sistem, sehingga diperlukan langkah-langkah strategis dalam perencanaan dan pemeliharaan infrastruktur guna menekan tingkat kehilangan air dan memastikan ketersediaan air bersih yang andal bagi masyarakat.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem jaringan distribusi air bersih milik PDAM Way Rilau dengan fokus pada wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 sebagai alat bantu simulasi hidraulik. Lokasi penelitian berada di Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung, yang merupakan bagian dari cakupan layanan PDAM Way Rilau. Keunikan studi ini terletak pada sejumlah aspek yang membedakannya dari penelitian terdahulu, antara lain perbedaan temporal, lokasi studi, pendekatan kalibrasi model, serta teknik analisis perbandingan antara hasil simulasi PDAM dan hasil simulasi yang dilakukan oleh penulis. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi tingkat kecukupan pasokan air bersih dengan membandingkan kapasitas produksi dari *reservoir* dengan kebutuhan air bersih masyarakat setempat. Sebagai bagian dari analisis berjangka panjang, dilakukan pula proyeksi jumlah penduduk pelanggan PDAM di wilayah DMA G26 guna memperkirakan kebutuhan air bersih selama dua puluh tahun ke depan.

2.2. Pengertian Air Bersih

Ketersediaan air bersih merupakan kebutuhan mendasar bagi kehidupan manusia yang menjadi tanggung jawab utama pemerintah. Hal ini ditegaskan dalam ketentuan mengenai Standar Pelayanan Minimum, yang menyatakan bahwa pemerintah berkewajiban untuk menjamin pemenuhan kebutuhan dasar masyarakat, termasuk dalam hal penyediaan air bersih. Seiring dengan laju pertumbuhan penduduk, permintaan terhadap air bersih juga mengalami peningkatan, mengingat air tersebut digunakan dalam berbagai aktivitas domestik seperti mandi, mencuci, memasak, hingga menyiram tanaman. Oleh karena itu, air bersih yang dikonsumsi masyarakat harus memenuhi persyaratan kualitas dan kuantitas tertentu agar aman digunakan. Standar tersebut telah diatur dalam (Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/Menkes/PER/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, 2010), yang mengatur parameter-parameter penting guna menjamin keamanan dan

kelayakan air minum untuk masyarakat.

Seiring berjalannya waktu, pertumbuhan jumlah penduduk menunjukkan tren peningkatan yang signifikan dari tahun ke tahun. Kondisi ini secara langsung berdampak pada meningkatnya kebutuhan akan air bersih, mengingat air merupakan elemen esensial yang dibutuhkan oleh seluruh komponen biotik dalam menjalankan berbagai aktivitas kehidupan. Air bersih berperan penting tidak hanya dalam aspek konsumsi, tetapi juga dalam mendukung kesehatan, kebersihan, dan produktivitas masyarakat. Meskipun demikian, pada kenyataannya masih terdapat sebagian masyarakat di wilayah perkotaan yang bergantung pada air sungai untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Padahal, kondisi air sungai di banyak wilayah umumnya telah mengalami pencemaran, terutama akibat limbah domestik dan industri, sehingga tidak lagi layak untuk digunakan secara langsung tanpa pengolahan. Penggunaan air sungai yang telah tercemar tentunya berpotensi menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi masyarakat. Oleh karena itu, dibutuhkan evaluasi menyeluruh terhadap sistem penyediaan air bersih, guna memastikan ketersediaan layanan air yang aman, layak, dan berkelanjutan bagi seluruh lapisan masyarakat. Menurut (Yuliani & Rahdriawan, 2015), kualitas kinerja sistem penyediaan air bersih dapat diukur melalui lima indikator utama, yaitu kualitas (mutu air yang didistribusikan), kuantitas (volume air yang tersedia), cakupan pelayanan (luas wilayah dan jumlah penduduk yang terlayani), kontinuitas (ketersediaan air secara berkelanjutan), serta pembiayaan (efisiensi dan keterjangkauan biaya layanan). Kelima indikator ini menjadi landasan penting dalam merancang strategi penyediaan air bersih yang adaptif terhadap dinamika kebutuhan dan tantangan lingkungan di masa mendatang.

2.3. Pengertian Air Minum

Air minum didefinisikan sebagai air yang digunakan untuk keperluan rumah tangga dan telah memenuhi persyaratan kesehatan, baik yang telah melalui

proses pengolahan maupun yang dapat langsung dikonsumsi tanpa perlakuan tambahan. Definisi ini merujuk pada ketentuan dalam (Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 16 Tahun 2005 Tentang Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2005). Air yang tergolong sebagai air minum harus aman dikonsumsi secara langsung dan tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi penggunaannya. Dalam konteks pelayanan publik, Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) sebagai entitas milik pemerintah daerah memegang peranan strategis dalam penyediaan dan distribusi air bersih kepada masyarakat. Sebagai penyelenggara layanan air minum, PDAM dituntut untuk memastikan bahwa sistem penyediaan air yang dikelolanya memenuhi empat prinsip dasar, yaitu kuantitas (kecukupan volume air), kualitas (kondisi air yang sesuai dengan standar kesehatan), kontinuitas (ketersediaan air secara berkelanjutan), dan keterjangkauan (aksesibilitas dan biaya yang wajar dari sumber hingga konsumen), sebagaimana dijelaskan oleh (Pinandari & Wilopo, 2018). Lebih lanjut, menurut (Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/Menkes/PER/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, 2010), air minum yang layak konsumsi adalah air yang memenuhi syarat dalam empat kategori utama, yaitu parameter fisik, kimia, mikrobiologi, dan radioaktif. Parameter-parameter tersebut dikelompokkan ke dalam parameter wajib dan tambahan, yang keseluruhannya dirancang untuk menjamin bahwa air yang dikonsumsi masyarakat bebas dari kontaminan yang berbahaya bagi kesehatan manusia..

2.4. Instalasi Pengolahan Air Minum

Ketersediaan air merupakan jumlah air yang diprediksi akan tetap tersedia secara kontinu dan dalam periode waktu tertentu. Air mentah yang berasal dari sumbernya seperti hujan, air tanah, atau air permukaan seringkali mempunyai kadar kekeruhan yang berfluktuasi dan bisa terkontaminasi oleh zat kimia serta organisme penyebab penyakit (Kencanawati, 2017). Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan untuk menghilangkan kekeruhan, zat kimia, dan organisme penyebab penyakit agar memenuhi standar untuk

air minum oleh unit pengolahan air bersih PDAM. Adapun proses pengolahan air sebelum menjadi air minum dari air permukaan adalah sebagai berikut:

1. Bangunan penangkap air (*intake*)

Intake merupakan struktur yang digunakan dalam pengambilan air yang berasal dari danau dan sungai, kemudian mengalirkannya ke instalasi pengolahan. *Intake* juga digunakan sebagai pintu masuk pertama bagi air dari sumbernya.

2. Proses koagulasi

Air pada *intake*, kemudian dipompa menuju proses koagulasi, yaitu tahap pencampuran zat kimia dan proses destabilisasi partikel koloid senyawa koagulan.

3. Proses flokulasi

Flokulasi adalah proses pembentukan flok dan penggumpalan partikel padat berukuran besar dari hasil proses koagulasi.

4. Proses sedimentasi

Proses sedimentasi atau pengendapan oleh massa flok.

5. Proses filtrasi

Filtrasi merupakan proses penyaringan air bersih dengan menghilangkan flok - flok halus yang lolos dari proses sedimentasi.

6. Proses disinfeksi

Proses ini bertujuan untuk membasmi bakteri yang masih ada dalam air.

Sumber utama ketersediaan air di PDAM Way Rilau untuk daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung adalah *intake* Bendungan Way Sekampung. Air mentah yang diambil dari sini kemudian diolah melalui berbagai sistem pengolahan air baku yang terbagi dalam zona - zona wilayah distribusi.

2.5. Sumber Air Bersih

Menurut (Sutrisno & Suciastuti, 2002), sumber air bersih merupakan elemen kunci dalam sistem penyediaan air bersih. Keberadaan sumber air yang memadai menjadi prasyarat mutlak bagi berfungsinya sistem penyediaan air secara keseluruhan. Tanpa adanya sumber air, maka proses penyediaan air bersih, baik untuk konsumsi domestik maupun non-domestik, tidak dapat dijalankan. Oleh karena itu, kualitas dan kuantitas sumber air perlu dijaga agar tetap berada dalam kondisi optimal. Sumber air yang terpelihara dengan baik akan menghasilkan air baku dengan mutu yang relatif tinggi. Meski demikian, sebelum dapat dikonsumsi oleh masyarakat, air tersebut tetap harus melalui proses pengolahan untuk memenuhi standar kualitas yang ditetapkan, terutama dalam aspek fisik, kimia, dan mikrobiologis. (Sutrisno & Suciastuti, 2002) juga mengidentifikasi bahwa terdapat beragam jenis sumber air yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air bersih, di antaranya meliputi air atmosfer, air permukaan, air tanah, dan mata air. Masing-masing jenis sumber air ini memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari sisi kualitas, ketersediaan, maupun pengaruh lingkungan, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kondisi geografis dan kebutuhan wilayah yang bersangkutan.

1. Air Atmosfer

Air atmosfer merupakan bagian dari siklus hidrologi yang terbentuk melalui proses evaporasi dari permukaan air dan evapotranspirasi yang berasal dari vegetasi, dengan bantuan energi matahari. Uap air yang terbentuk kemudian mengalami proses kondensasi di atmosfer dan kembali ke permukaan bumi dalam bentuk presipitasi, seperti hujan, salju, atau embun. Secara umum, air atmosfer memiliki karakteristik sebagai air lunak (*soft water*) karena kandungan garam mineral dan zat terlarut lainnya sangat rendah. Hal ini menyebabkan rasa air terasa kurang karena minimnya kandungan elektrolit alami. Meskipun demikian, sifat kimia air atmosfer juga cenderung agresif terhadap material logam, khususnya pada infrastruktur sistem distribusi seperti

pipa penyalur dan bak penampung (*reservoir*). Sifat agresif ini berpotensi mempercepat proses korosi pada permukaan logam, sehingga menimbulkan kerusakan dan menurunkan umur teknis sistem distribusi air. Oleh karena itu, penggunaan air atmosfer sebagai sumber air bersih memerlukan perlakuan khusus, baik dari segi pengolahan maupun pemilihan material infrastruktur, agar dampak negatifnya dapat diminimalkan.

2. Air Permukaan

Air permukaan adalah air yang berasal dari hujan dan mengalir di atas permukaan bumi melalui saluran alami seperti sungai, danau, maupun saluran buatan. Selama proses alirannya, air permukaan cenderung mengalami kontaminasi akibat interaksi langsung dengan berbagai unsur di lingkungan. Tingkat pencemaran yang terjadi sangat dipengaruhi oleh karakteristik daerah tangkapan air atau wilayah aliran air tersebut. Faktor-faktor seperti penggunaan lahan, aktivitas pertanian, permukiman, dan industri di sepanjang daerah aliran sungai (DAS) turut menentukan jenis dan jumlah bahan pencemar yang terbawa ke dalam air. Oleh karena itu, kualitas air permukaan sangat bervariasi antar wilayah, bergantung pada kondisi lingkungan dan tingkat aktivitas manusia di daerah pengaliran tersebut.

a. Sumber Air Permukaan (*Surface Water*)

Sumber air permukaan merujuk pada badan air yang secara alami berada di atas permukaan tanah, seperti sungai, danau, dan waduk. Salah satu contoh utama dari sumber air permukaan adalah air sungai, yang kerap dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat. Di wilayah hulu sungai, kualitas dan kuantitas air umumnya masih terjaga dengan baik karena minimnya gangguan aktivitas manusia dan kondisi lingkungan yang relatif alami. Namun, seiring dengan aliran menuju daerah hilir, kualitas dan kuantitas air cenderung mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain sedimentasi, pencemaran limbah domestik maupun industri, serta degradasi lingkungan akibat

aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan. Sebagai konsekuensinya, air permukaan yang berada di daerah hilir sering kali tidak lagi memenuhi standar sebagai air baku untuk keperluan konsumsi, baik dari aspek fisik, kimia, maupun biologis. Oleh karena itu, sebelum air permukaan dimanfaatkan sebagai sumber air bersih, perlu dilakukan proses pengolahan terlebih dahulu. Pengolahan ini bertujuan untuk menyesuaikan karakteristik air baku agar sesuai dengan persyaratan kualitas air bersih yang aman, layak konsumsi, dan tidak membahayakan kesehatan masyarakat.

b. Air Rawa

Secara umum, air rawa memiliki karakteristik fisik yang khas, salah satunya adalah berwarna gelap akibat tingginya kandungan zat organik hasil dekomposisi bahan-bahan alami seperti daun dan serasah tumbuhan. Proses pembusukan ini menyebabkan kadar oksigen terlarut (O_2) dalam air menjadi rendah. Kondisi tersebut berdampak pada meningkatnya kelarutan unsur logam seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) di dalam air, yang apabila tidak ditangani dengan baik dapat menurunkan kualitas air untuk kebutuhan konsumsi. Selain itu, pada permukaan air rawa sering dijumpai pertumbuhan *algae* atau lumut, yang muncul sebagai hasil interaksi antara sinar matahari dan oksigen di permukaan. Keberadaan *algae* ini juga dapat mempercepat eutrofikasi dan memperburuk kualitas air secara biologis. Oleh karena itu, dalam pengambilan air dari sumber rawa, disarankan untuk mengambilnya dari bagian tengah atau area yang relatif jauh dari tepi. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan terbawanya endapan logam seperti Fe dan Mn, serta material biotik seperti lumut yang umumnya lebih banyak terkonsentrasi di sekitar permukaan dan pinggiran rawa. Strategi ini penting untuk menjaga efisiensi proses pengolahan air dan meningkatkan kualitas air baku yang dihasilkan..

3. Air Tanah

Berdasarkan ketentuan dalam (Undang-Undang (UU) Nomor 7 Tahun

2004 tentang Sumber Daya Air, 2004), air tanah didefinisikan sebagai air yang tersimpan dan mengalir di dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan bumi. Sumber utama air tanah berasal dari air hujan yang turun ke permukaan bumi, kemudian meresap melalui pori-pori tanah dan mengalami proses penyaringan (filtrasi) secara alami oleh lapisan-lapisan geologis yang dilaluinya. Selama proses peresapan ini, air mengalami pemurnian secara alami, sehingga ketika mencapai lapisan akuifer, kualitasnya cenderung lebih baik dan lebih murni dibandingkan dengan air permukaan yang lebih rentan terhadap pencemaran. Proses filtrasi alami ini menjadikan air tanah sebagai salah satu sumber air bersih yang potensial untuk berbagai kebutuhan, terutama air minum. Dalam klasifikasinya, air tanah dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

a. Air Tanah Dangkal

Air tanah dangkal terbentuk melalui proses infiltrasi atau peresapan air dari permukaan tanah yang kemudian tertampung di lapisan akuifer atas. Selama proses peresapan ini, partikel lumpur dan sebagian besar mikroorganisme, termasuk bakteri, akan tersaring secara alami oleh lapisan tanah, sehingga air tanah dangkal cenderung memiliki kejernihan yang relatif tinggi. Meskipun demikian, air jenis ini umumnya mengandung berbagai zat kimia dalam konsentrasi yang bervariasi, tergantung pada komposisi unsur-unsur kimia yang terdapat dalam setiap lapisan tanah yang dilaluinya. Namun, karena letaknya yang dekat dengan permukaan tanah, air tanah dangkal rentan terhadap kontaminasi dari aktivitas permukaan, seperti limbah domestik, pertanian, dan sanitasi yang tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, kualitas air tanah dangkal dapat mengalami penurunan apabila tidak dilakukan pengelolaan dan perlindungan sumber air secara optimal. Meski demikian, air tanah dangkal masih banyak dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai sumber air minum melalui pembuatan sumur dangkal, khususnya di wilayah pedesaan dan permukiman yang belum terlayani sistem perpipaan air bersih.

b. Air Tanah Dalam

Air tanah dalam terletak di bawah lapisan kedap air pertama dan umumnya berada pada kedalaman yang cukup signifikan, yaitu antara 100 hingga 300 meter dari permukaan tanah. Untuk dapat memanfaatkan air dari lapisan ini, diperlukan metode pengeboran khusus guna mencapai akuifer dalam. Apabila tekanan hidrostatik pada lapisan tersebut cukup tinggi, air dapat keluar secara spontan ke permukaan melalui sumur tanpa bantuan alat mekanis. Sumur jenis ini dikenal sebagai sumur artesis, yang memanfaatkan tekanan alami dari lapisan tanah. Namun, dalam kondisi di mana tekanan tidak mencukupi untuk mendorong air hingga ke permukaan, maka dibutuhkan penggunaan pompa untuk mengangkat air dari dalam sumur ke permukaan. Sistem ini umumnya digunakan dalam instalasi penyediaan air bersih yang membutuhkan sumber air dengan kualitas relatif stabil dan terlindung dari pencemaran permukaan.

4. Mata Air

Mata air merupakan salah satu bentuk keluaran alami dari air tanah yang muncul secara spontan ke permukaan tanah tanpa memerlukan bantuan mekanis. Umumnya, mata air terbentuk akibat tekanan hidrostatik dalam lapisan akuifer yang mendorong air keluar melalui celah atau retakan pada permukaan bumi. Mata air yang bersumber dari lapisan tanah dalam memiliki karakteristik yang stabil, baik dari segi kuantitas maupun kualitas, serta cenderung tidak dipengaruhi oleh fluktuasi musim, seperti musim kemarau atau hujan. Hal ini disebabkan oleh kedalaman asal air yang relatif jauh dari permukaan, sehingga lebih terlindungi dari pencemaran langsung dan perubahan iklim. Kualitas air yang dihasilkan oleh mata air dalam umumnya menyerupai air tanah dalam, yang biasanya memenuhi syarat sebagai sumber air baku untuk keperluan domestik maupun air minum, tergantung pada parameter kualitas fisik, kimia, dan mikrobiologisnya.

Selain sumber air bersih yang langsung dapat digunakan untuk kebutuhan domestik, tersedia pula sumber air baku yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku air minum, selama memenuhi standar kualitas tertentu. Sumber-sumber air baku tersebut meliputi air permukaan (seperti sungai, danau, dan waduk), cekungan air tanah, serta air hujan yang telah melalui proses pengumpulan dan penyaringan yang memadai. Agar layak dijadikan sebagai bahan baku untuk produksi air minum, sumber-sumber ini harus memenuhi persyaratan baku mutu yang telah ditetapkan dalam regulasi nasional. Dalam hal ini, acuan utama yang digunakan adalah (Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/Menkes/PER/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, 2010). Peraturan ini memuat standar-standar fisik, kimia, mikrobiologis, dan radioaktif yang wajib dipenuhi oleh air baku sebelum diproses lebih lanjut menjadi air layak konsumsi. Oleh karena itu, pemilihan dan pemanfaatan sumber air baku harus dilakukan secara selektif dan berbasis data kualitas, guna menjamin bahwa air yang dihasilkan memenuhi syarat kesehatan dan aman untuk dikonsumsi masyarakat.

2.6. Persyaratan Penyediaan Air Bersih

Dalam proses perencanaan sistem penyediaan air bersih, perlu diperhatikan prinsip dasar yang dikenal sebagai konsep 3K, yaitu kualitas, kuantitas, dan kontinuitas. Ketiga elemen ini merupakan pilar utama yang harus dipenuhi agar sistem penyediaan air dapat berfungsi secara optimal dan berkelanjutan. Aspek kualitas mencakup pemenuhan standar mutu air yang didistribusikan, baik dari segi fisik, kimia, maupun mikrobiologis, sehingga air tersebut aman dan layak untuk dikonsumsi. Selanjutnya, kuantitas berkaitan dengan jumlah ketersediaan air baku yang dapat diolah menjadi air bersih siap pakai. Ketersediaan ini sangat menentukan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan air bagi wilayah pelayanan. Kuantitas umumnya dianalisis melalui standar debit aliran air yang diperlukan untuk mencukupi permintaan konsumen. Adapun aspek kontinuitas mengacu pada keberlanjutan pasokan

air bersih dalam jangka panjang. Hal ini mencakup kemampuan sumber air untuk menyediakan pasokan secara konsisten sepanjang waktu, termasuk pada periode kritis seperti musim kemarau. Kontinuitas sangat penting untuk menjamin bahwa kebutuhan air masyarakat dapat terpenuhi secara terus-menerus, tanpa mengalami gangguan yang berarti. Dengan menerapkan konsep 3K secara terpadu, maka sistem penyediaan air bersih dapat dirancang secara efisien, andal, dan berorientasi jangka panjang.

Mengingat peranannya yang sangat luas dan berkelanjutan dalam menunjang berbagai aspek kehidupan, penyediaan air bersih harus memenuhi sejumlah persyaratan penting agar dapat digunakan secara aman dan efektif oleh seluruh lapisan masyarakat. Air bersih yang disediakan tidak hanya harus memenuhi standar higienitas, tetapi juga layak untuk dikonsumsi sebagai air minum tanpa menimbulkan risiko kesehatan. Selain itu, aspek ketersediaan juga menjadi krusial air harus tersedia dalam jumlah yang memadai untuk memenuhi kebutuhan harian masyarakat secara terus-menerus. Tak kalah penting, aksesibilitas air bersih juga harus terjamin bagi seluruh golongan sosial, tanpa diskriminasi terhadap status ekonomi. Dengan demikian, penyediaan air bersih yang aman, cukup, dan terjangkau merupakan fondasi penting dalam mendukung kesehatan masyarakat dan pembangunan berkelanjutan.

2.6.1. Persyaratan Kualitatif

Agar air dapat dikonsumsi secara aman dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan, maka kualitasnya harus memenuhi standar tertentu yang telah ditetapkan. Pemenuhan standar kualitas ini menjadi indikator penting dalam menjamin bahwa air yang digunakan masyarakat, baik untuk minum maupun keperluan domestik lainnya, tidak mengandung zat berbahaya atau mikroorganisme patogen yang dapat menyebabkan gangguan

kesehatan. Untuk itu, diperlukan pengujian terhadap berbagai parameter kualitas air, baik dari aspek fisik, kimia, mikrobiologis, maupun radioaktif. Standar-standar ini mencakup batas maksimum kandungan zat-zat tertentu dan kondisi fisik air yang dapat diterima, seperti kejernihan, bau, rasa, suhu, serta kandungan logam berat, senyawa kimia, dan mikroorganisme. Berikut ini adalah parameter-parameter utama dalam standar kualitas air bersih yang wajib dipenuhi agar air tersebut layak digunakan dan aman bagi kehidupan sehari-hari.

1. Persyaratan fisik

Air bersih yang memenuhi syarat untuk dikonsumsi harus bebas dari bau yang mencolok. Kehadiran bau dalam air biasanya disebabkan oleh adanya senyawa kimia tertentu seperti hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), senyawa fenol, dan zat organik lainnya yang dapat menurunkan kualitas air dan menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna. Selain bebas bau, air bersih juga harus tidak berwarna, karena warna tidak hanya memengaruhi aspek estetika, tetapi juga mengindikasikan keberadaan zat pencemar dan dapat mengganggu efektivitas proses desinfeksi, khususnya pada air yang keruh. Dalam aspek kekeruhan, standar kualitas fisik air minum mensyaratkan bahwa tingkat kekeruhan tidak boleh melebihi 5 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*), sesuai dengan batas maksimum yang ditetapkan dalam standar mutu air bersih. Air yang keruh menandakan adanya partikel tersuspensi yang berpotensi mengikat mikroorganisme patogen dan bahan kimia berbahaya. Selain itu, air yang layak konsumsi seharusnya tidak memiliki rasa. Rasa yang muncul menunjukkan adanya zat terlarut yang dapat bersifat toksik atau menyebabkan gangguan kesehatan jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Suhu juga menjadi salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas fisik air. Idealnya, suhu air minum setara dengan suhu lingkungan sekitar, yakni berkisar

pada $\pm 25^{\circ}\text{C}$, dengan batas toleransi antara 22°C hingga 28°C . Suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat memengaruhi kualitas sensori dan kestabilan zat terlarut dalam air. Oleh karena itu, syarat fisik air bersih mencakup bau, warna, rasa, kekeruhan, dan suhu sebagai indikator penting dalam menentukan kelayakan air untuk dikonsumsi masyarakat..

2. Persyaratan kimia

Untuk menjaga mutu air bersih yang aman bagi konsumsi, diberlakukan persyaratan kimiawi yang menetapkan batas maksimum terhadap kandungan berbagai zat kimia di dalam air. Ketentuan ini bertujuan untuk mencegah risiko kesehatan yang dapat timbul akibat paparan zat kimia dalam jumlah berlebih. Beberapa parameter kimia yang umum dijumpai dalam air antara lain meliputi tingkat keasaman (pH), total zat padat terlarut (*total solids*), zat organik, karbon dioksida agresif (CO_2 agresif), serta tingkat kesadahan. Selain itu, kandungan unsur logam seperti Kalsium (Ca), Besi (Fe), Mangan (Mn), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn), serta ion anorganik seperti Klorida (Cl), Nitrit (NO_2), dan Fluorida (F) juga turut menjadi indikator kualitas air. Di samping unsur-unsur tersebut, keberadaan logam berat dalam konsentrasi tertentu juga perlu diawasi secara ketat karena dapat bersifat toksik bagi tubuh manusia. Semua parameter ini memiliki batas ambang yang telah ditetapkan dalam standar kualitas air, baik oleh lembaga nasional maupun internasional, guna menjamin bahwa air yang dikonsumsi tidak menimbulkan efek samping yang merugikan. Apabila kandungan zat kimia melebihi ambang batas yang ditentukan, air tersebut tidak lagi memenuhi kriteria sebagai air bersih dan tidak layak digunakan untuk kebutuhan masyarakat, baik untuk konsumsi langsung maupun keperluan domestik lainnya.

3. Persyaratan mikrobiologis

Persyaratan mikrobiologis yang harus dipenuhi oleh air bersih

agar layak dikonsumsi oleh masyarakat mencakup sejumlah ketentuan terkait keberadaan mikroorganisme dalam air. Persyaratan ini bertujuan untuk menjamin bahwa air tidak mengandung organisme yang dapat menimbulkan risiko kesehatan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Standar mikrobiologis tersebut mengacu pada ambang batas yang telah ditetapkan oleh peraturan nasional maupun internasional, yang mencakup antara lain ketiadaan bakteri patogen, serta batas maksimal untuk mikroorganisme non-patogen yang dapat memengaruhi kualitas sensorik air. Pemenuhan persyaratan ini menjadi bagian integral dalam sistem pengawasan mutu air, guna memastikan bahwa air yang disuplai kepada masyarakat benar-benar aman untuk dikonsumsi.

- a. Air bersih yang layak konsumsi harus terbebas dari keberadaan bakteri patogen, yaitu mikroorganisme yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia. Jenis-jenis bakteri patogen yang umum ditemukan dalam air tercemar meliputi bakteri dari kelompok *Coli* (seperti *Escherichia coli*), *Salmonella*, *Vibrio cholerae*, serta bakteri patogen lainnya yang berpotensi menimbulkan gangguan sistem pencernaan dan infeksi serius. Bakteri-bakteri ini dapat menyebar dengan cepat melalui media air, terutama apabila sistem sanitasi tidak memadai atau terjadi pencemaran sumber air baku. Oleh karena itu, pengujian parameter mikrobiologis menjadi bagian penting dalam pengendalian mutu air, guna memastikan bahwa air yang dikonsumsi masyarakat benar-benar aman dan tidak menjadi media penularan penyakit.
- b. Air bersih yang layak konsumsi juga harus terbebas dari mikroorganisme non-patogen yang dapat memengaruhi bau, rasa, atau kejernihan air, meskipun tidak secara langsung menimbulkan penyakit. Mikroorganisme tersebut antara lain termasuk bakteri seperti *Actinomyces*, serta organisme lain

seperti *fitoplankton*, *Cladocera*, dan kelompok *Coliform non-patogen*. Kehadiran organisme-organisme ini dapat menurunkan mutu estetika air dan menimbulkan gangguan kenyamanan bagi pengguna. Oleh karena itu, dalam pengelolaan kualitas air, aspek biologis harus dikendalikan secara ketat agar air yang didistribusikan tidak hanya aman secara kesehatan, tetapi juga memenuhi standar mutu dari sisi sensorik dan ekologis..

4. Persyaratan radiologis

Persyaratan ini menegaskan bahwa air bersih yang dinyatakan layak untuk dikonsumsi dan digunakan sebagai sumber pemenuhan kebutuhan sehari-hari tidak boleh mengandung zat-zat yang bersifat radioaktif. Keberadaan kontaminan radioaktif, seperti radiasi sinar alfa (α), beta (β), dan gamma (γ), sangat berbahaya bagi kesehatan manusia jika terakumulasi dalam tubuh melalui konsumsi air. Oleh karena itu, air yang akan digunakan untuk keperluan domestik maupun non-domestik harus terlebih dahulu diuji untuk memastikan bahwa kadar radioaktivitasnya berada di bawah ambang batas yang telah ditetapkan oleh standar kesehatan dan lingkungan yang berlaku, baik secara nasional maupun internasional. Pengawasan terhadap parameter ini menjadi bagian penting dalam menjamin kualitas air bersih yang aman bagi masyarakat.

2.6.2. Persyaratan Kuantitas

Persyaratan kuantitas dalam penyediaan air bersih merujuk pada kecukupan volume atau debit air yang disalurkan kepada konsumen, yang harus sesuai dengan besarnya kebutuhan yang ada. Kecukupan ini menjadi indikator penting dalam menjamin bahwa seluruh pengguna memperoleh pasokan air yang memadai untuk memenuhi

kebutuhan sehari-hari secara berkelanjutan. Kebutuhan air bersih sendiri tidak bersifat seragam, melainkan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi geografis, latar belakang kebudayaan, tingkat kesejahteraan ekonomi masyarakat, serta klasifikasi kota atau wilayah tempat tinggalnya. Dengan demikian, syarat kuantitas mengandung makna bahwa volume air bersih yang tersedia dan didistribusikan harus mampu memenuhi standar kebutuhan minimal yang telah ditetapkan, baik berdasarkan jumlah penduduk, jenis aktivitas, maupun karakteristik wilayah. Pemenuhan standar kuantitas ini menjadi dasar dalam perencanaan dan evaluasi kinerja sistem penyediaan air, agar dapat menjamin akses yang adil, merata, dan berkelanjutan bagi seluruh lapisan masyarakat.

Dalam proses penyediaan air bersih bagi masyarakat, salah satu aspek krusial yang harus dipenuhi adalah ketersediaan air baku dalam jumlah yang mencukupi. Air baku tersebut perlu melalui tahapan pengolahan terlebih dahulu agar memenuhi standar kualitas yang layak untuk dikonsumsi. Setelah melalui proses tersebut, air bersih yang dihasilkan dapat didistribusikan dan digunakan secara optimal untuk memenuhi kebutuhan para pelanggan sesuai dengan jumlah dan pola konsumsi yang berlaku. Namun demikian, kebutuhan air bersih masyarakat tidak bersifat seragam, melainkan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Variasi kebutuhan ini dapat dilihat berdasarkan letak geografis wilayah, latar belakang kebudayaan, tingkat ekonomi, kondisi sosial, serta skala atau klasifikasi kota tempat masyarakat tersebut tinggal. Masing-masing faktor memberikan kontribusi terhadap besarnya konsumsi air harian per kapita. Hal ini sebagaimana tercantum dalam (SNI 6728.1:2015 Tentang Penyusunan Neraca Spasial Sumber Daya Alam-Bagian 1: Sumber Daya Air, 2015), yang pada Tabel 2.1 menyajikan perbandingan kebutuhan air bersih masyarakat berdasarkan karakteristik wilayah dan indikator sosial ekonomi lainnya. Informasi ini penting digunakan

sebagai dasar dalam merencanakan sistem penyediaan air yang proporsional dan tepat sasaran.

Tabel 2.1. Kebutuhan Air Berdasarkan Kategori Kota

No	Kategori Kota	Jumlah Penduduk (orang)	Kebutuhan Air (ltr/org/hari)
1	Metropolitan	> 1.000.000	150-200
2	Besar	500.000 - 1.000.000	120-150
3	Sedang	100.000 - 500.000	100-125
4	Kecil	20.000 - 100.000	90-110
5	Pedesaan	< 20.000	60-90

Sumber: SNI 6728.1:2015

2.6.3. Persyaratan Kontinuitas

Menurut (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 27/PRT/M/2016 Tahun 2016 Tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum, 2016), salah satu persyaratan penting dalam pelayanan air bersih adalah terpenuhinya aspek kontinuitas. Kontinuitas dalam hal ini diartikan sebagai kemampuan sistem untuk menyediakan air bersih secara terus-menerus selama 24 jam sehari, atau tersedia kapan pun dibutuhkan oleh masyarakat. Ketersediaan air yang mengalir secara berkelanjutan ini diharapkan memiliki tingkat fluktuasi yang relatif stabil sehingga dapat menunjang aktivitas sehari-hari pengguna tanpa gangguan berarti. Namun dalam implementasinya, sebagian besar institusi penyedia air minum masih menghadapi kesulitan dalam memenuhi standar kontinuitas tersebut. Salah satu faktor utama yang menjadi penyebab adalah rendahnya tekanan air dalam jaringan pipa distribusi, yang menghambat aliran air secara optimal hingga ke konsumen. Selain itu, tingginya tingkat kehilangan air akibat kebocoran jaringan, sambungan ilegal, dan inefisiensi sistem distribusi juga menjadi kendala serius yang

memengaruhi kemampuan layanan untuk memenuhi suplai air secara konsisten. Oleh karena itu, perbaikan sistem teknis dan manajemen operasional sangat diperlukan agar prinsip kontinuitas dalam pelayanan air bersih dapat terwujud sesuai dengan ketentuan regulasi yang berlaku.

2.7. Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih

Kebutuhan air bersih merujuk pada jumlah air yang diperlukan untuk menunjang berbagai aktivitas sehari-hari masyarakat, baik dalam konteks domestik maupun non-domestik. Air bersih yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut secara umum harus memenuhi dua kriteria utama, yaitu dari segi kuantitas mampu mencukupi kebutuhan harian pengguna, dan dari segi kualitas harus sesuai dengan standar kesehatan yang telah ditetapkan. Hal ini sejalan dengan pandangan (Asmadi & Kasjono, 2011) yang menekankan bahwa sumber air bersih idealnya harus memenuhi standar baik dari segi jumlah maupun mutu agar dapat digunakan secara aman dan efektif oleh masyarakat. Lebih lanjut, menurut (Linsley & Franzini, 1996), konsumsi air dalam suatu komunitas tidak hanya terbatas pada kebutuhan rumah tangga, tetapi juga mencakup kebutuhan yang lebih luas seperti industri, fasilitas komersial, dan layanan publik di lingkungan perkotaan. Penggunaan air dalam sektor-sektor tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jumlah penduduk, tingkat urbanisasi, kegiatan ekonomi, serta standar hidup masyarakat. Oleh karena itu, perencanaan penyediaan air bersih harus dilakukan secara cermat dan mempertimbangkan kemungkinan variasi dalam pola pemakaian, agar sistem yang dirancang mampu menjawab kebutuhan yang dinamis dan beragam.

2.7.1. Penyediaan Air Domestik

Penentuan standar penyediaan air untuk keperluan domestik dilakukan dengan mengacu pada jumlah konsumen yang diperoleh dari data kependudukan wilayah yang bersangkutan. Kebutuhan air domestik mencakup seluruh penggunaan air yang berkaitan dengan aktivitas rumah tangga, seperti mencuci, mandi, menyiram tanaman, memasak, air minum, dan kegiatan domestik lainnya yang bersifat rutin dan mendasar. Oleh karena itu, kategori kebutuhan ini menjadi komponen utama dalam perencanaan sistem penyediaan air bersih. Berdasarkan pedoman (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), tujuan utama penyediaan air domestik adalah untuk menjamin ketersediaan air bersih bagi seluruh rumah tangga melalui sistem yang dapat diakses secara langsung. Penyediaan ini direalisasikan melalui dua jalur utama, yaitu Sambungan Rumah (SR), yang menyediakan air secara langsung ke rumah tangga, dan Hidran Umum (HU), yang berfungsi sebagai fasilitas bersama untuk masyarakat yang belum terlayani oleh SR. Pendekatan ini bertujuan untuk menjamin keterjangkauan dan pemerataan akses air bersih, terutama di kawasan dengan keterbatasan infrastruktur rumah tangga.

Tabel 2.2. Konsumsi Air Bersih Domestik

URAIAN	KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH PENDUDUK				
	(JIWA)				
	>1.000.000	500.000 s/d 1.000.000	100.000 s/d 500.000	20.000 s/d 100.000	<20.000
	Kota Metropolitan	Kota Besar	Kota Sedang	Kota Kecil	Desa
1	2	3	4	5	6
1. Konsumsi Unit Sambungan Rumah (SR) (Liter/org/hari)	190	170	130	100	80

Tabel 2.2. (lanjutan)

URAIAN	KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH PENDUDUK				
	(JIWA)				
	>1.000.000	500.000 s/d 1.000.000	100.000 s/d 500.000	20.000 s/d 100.000	<20.000
	Kota Metropolitan	Kota Besar	Kota Sedang	Kota Kecil	Desa
1	2	3	4	5	6
2. Konsumsi Unit Hidran (HU) (Liter/org/hari)	30	30	30	30	30
3. Konsumsi Unit Non Domestik (%)	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
4. Kehilangan Air (%)	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30
5. Faktor Harian Maksimum	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6. Faktor Jam Puncak	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7. Jumlah Jiwa Per SR (Jiwa)	5	5	5	5	5
8. Jumlah Jiwa Per HU (Jiwa)	100	100	100	100	100
9. Sisa Tekan di Penyediaan Distribusi (Meter)	10	10	10	10	10
10. Jam Operasi (Jam)	24	24	24	24	24
11. Volume Reservoir (% Max Day Demand)	20	20	20	20	20
12. SR : HU	50 : 50 s/d 80 : 20	50 : 50 s/d 80 : 20	80 : 20	70 : 30	70 : 30
13. Cakupan Pelayanan (%)	*) 90	90	90	90	**) 70

Sumber: Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000

Rerata penggunaan air bersih rumah tangga setiap hari dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$K_{rt} = \frac{\sum_{i=1}^n K}{n} \quad (2.1)$$

Keterangan:

K = Rerata penggunaan air bersih rumah tangga setiap hari
(Ltr/hr atau lt/detik)

K_{rt} = Rerata penggunaan air bersih rumah tangga setiap hari
(Ltr/kk/hr atau lt/detik)

n = Jumlah data

Penggunaan air per hari tiap orang juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$K_{org} = \frac{K_{rt}}{X_{org}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

K_{org} = Rerata penggunaan air bersih per orang setiap hari
(Ltr/hr atau lt/detik)

K_{rt} = Rerata penggunaan air bersih rumah tangga setiap hari
(Ltr/kk/hr atau lt/detik)

X_{org} = Rerata total jumlah orang dalam rumah tangga

Kebutuhan air domestik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_{dom} = Q_{Rata-rata} \times Total Penduduk \quad (2.3)$$

Keterangan:

Q_{dom} = Kebutuhan air domestik

$Q_{rata-rata}$ = Kebutuhan air rata-rata

2.7.2. Penyediaan Air Non Domestik

Penyediaan air untuk keperluan non-domestik mencakup kebutuhan konsumsi air pada berbagai jenis fasilitas publik, seperti perkantoran, kawasan pariwisata, tempat ibadah, serta berbagai fasilitas umum

lainnya. Kebutuhan air pada sektor-sektor tersebut cenderung meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan intensitas aktivitas di wilayah pelayanan tersebut. Oleh karena itu, perencanaan kebutuhan air non-domestik harus mempertimbangkan perkembangan sosial ekonomi setempat yang berpengaruh langsung terhadap volume konsumsi air. Menurut (Kodoatie & Sjarief, 2017), estimasi kebutuhan air non-domestik berada pada kisaran 20% hingga 25% dari total kebutuhan air domestik. Sementara itu, berdasarkan (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), persentase kebutuhan air untuk sektor non-domestik diperkirakan berkisar antara 20% hingga 30% dari kebutuhan domestik. Perbedaan kisaran ini mencerminkan adanya fleksibilitas dalam perencanaan, tergantung pada karakteristik wilayah, jenis fasilitas, dan intensitas penggunaannya. Dengan demikian, perhitungan kebutuhan air non-domestik perlu dilakukan secara cermat agar sistem penyediaan air yang dirancang mampu memenuhi permintaan dari seluruh sektor pengguna secara proporsional.

Tabel 2.3. Kebutuhan Air Non Domestik

Sektor	Besaran Nilai	Satuan
Sekolah	5 - 10	Liter/murid/hari
Rumah Sakit	200	Liter/bed/hari
Puskesmas	1200 - 2000	Liter/hari
Komersial/Industri	10	Liter/hari
Masjid	3000	Liter/hari
Kantor	10	Liter/pegawai/hari
Pasar	12000	Liter/hektar/hari
Hotel/Losmen	90 - 150	Liter/bed/hari
Rumah Makan	100	Liter/kursi/hari
Komplek Militer	60	Liter/orang/hari
Kawasan Industri	0,2 - 0,8	Liter/detik/hektar
Kawasan Pariwisata	0,1 - 0,3	Liter/detik/hektar
Lapangan Terbang	10	Liter/detik
Pelabuhan	50	Liter/detik
Stasiun KA – Terminal Bus	1200	Liter/detik

Sumber: Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000

Kebutuhan air domestik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_{nond} = (Q_{nond}\%) \times Q_{dom} \quad (2.4)$$

Keterangan:

Q_{nond} = Kebutuhan air non domestik (lt/detik atau lt/org/hr)

$Q_{nond}\%$ = Persentase kebutuhan air non domestik (%)

Q_{dom} = Kebutuhan air domestik (lt/detik atau lt/org/hr)

Kebutuhan air juga mencakup pemenuhan terhadap berbagai sarana dan prasarana penunjang kehidupan masyarakat desa, seperti fasilitas pendidikan (sekolah), fasilitas keagamaan (masjid dan musholla), layanan kesehatan (puskesmas), serta kegiatan produktif seperti peternakan dan perkebunan. Fasilitas-fasilitas tersebut tergolong dalam kategori kebutuhan air non-domestik karena penggunaannya berada di luar konsumsi rumah tangga sehari-hari. Menurut pedoman yang ditetapkan dalam (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), estimasi kebutuhan air untuk sektor non-domestik yang meliputi kegiatan industri, komersial, institusi, dan sosial berkisar antara 20% hingga 30% dari total kebutuhan air domestik. Angka ini dapat dijadikan acuan dalam proses perencanaan sistem penyediaan air bersih, khususnya untuk wilayah perdesaan yang mulai mengalami pertumbuhan kegiatan sosial ekonomi. Dengan memperhitungkan proporsi kebutuhan non-domestik secara tepat, sistem distribusi air yang dirancang akan lebih mampu mengakomodasi permintaan dari berbagai sektor pengguna, sehingga keberlanjutan layanan air bersih dapat terjaga secara menyeluruh.

2.8. Proyeksi Kebutuhan Air Bersih

Dalam upaya menentukan kebutuhan air bersih di masa mendatang, (Muliakusumah, 2000) menekankan pentingnya memperhatikan dua aspek utama, yakni kondisi eksisting saat ini serta proyeksi jumlah penduduk di masa yang akan datang. Analisis terhadap situasi terkini, seperti kapasitas sistem penyediaan air, cakupan pelayanan, dan tingkat konsumsi aktual, menjadi landasan awal dalam merumuskan estimasi kebutuhan air. Namun demikian, untuk menyusun perencanaan jangka panjang yang akurat dan berkelanjutan, dibutuhkan proyeksi pertumbuhan penduduk sebagai salah satu indikator kunci dalam menentukan besaran permintaan air di masa depan. Proyeksi pertumbuhan penduduk tersebut dapat dihitung melalui tiga metode utama, yaitu metode aritmatik, metode geometrik, dan metode eksponensial. Masing-masing metode memiliki pendekatan dan asumsi yang berbeda dalam menggambarkan pola pertumbuhan, sehingga pemilihannya perlu disesuaikan dengan karakteristik demografis wilayah yang dianalisis. Hasil proyeksi ini nantinya akan menjadi acuan dalam merancang kapasitas sistem distribusi air bersih agar dapat memenuhi kebutuhan masyarakat secara optimal dalam jangka panjang.

1. Proyeksi Pertumbuhan Penduduk

Dalam rangka memproyeksikan pertumbuhan jumlah penduduk pada periode waktu mendatang, terdapat tiga metode utama yang lazim digunakan dalam analisis demografis, yaitu metode aritmatik, metode geometrik, dan metode eksponensial. Ketiga pendekatan ini menawarkan model perhitungan yang berbeda-beda, tergantung pada pola pertumbuhan populasi yang diamati di wilayah studi. Metode aritmatik mengasumsikan bahwa penambahan jumlah penduduk terjadi secara linier dengan penambahan jumlah tetap setiap tahun. Sebaliknya, metode geometrik mendasarkan perhitungannya pada tingkat pertumbuhan tahunan yang bersifat persentase konstan, sehingga mencerminkan pola pertumbuhan yang lebih dinamis. Sementara itu, metode eksponensial menggambarkan pertumbuhan populasi yang meningkat secara progresif

dan akseleratif, di mana laju pertumbuhan akan semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu. Setelah masing-masing metode diaplikasikan terhadap data historis yang tersedia, langkah selanjutnya adalah melakukan evaluasi terhadap hasil proyeksi dengan membandingkan tingkat deviasi antara data hasil proyeksi dan data aktual. Metode yang menghasilkan nilai deviasi terkecil dipilih sebagai pendekatan yang paling representatif, karena menunjukkan kesesuaian yang paling tinggi dengan tren pertumbuhan yang sesungguhnya terjadi di masa lalu. Oleh karena itu, metode dengan deviasi terkecil dinilai paling layak digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pembangunan, termasuk dalam estimasi kebutuhan air bersih di masa depan. Selanjutnya, rumus-rumus yang digunakan dalam masing-masing metode proyeksi akan diuraikan pada bagian berikut sebagai acuan teknis dalam proses perhitungan.

a. Metode Aritmatik

Metode aritmatik dalam proyeksi penduduk didasarkan pada asumsi bahwa pertumbuhan jumlah penduduk akan mengalami peningkatan secara linear, yakni dengan penambahan jumlah yang konstan setiap tahunnya. Dalam pendekatan ini, diasumsikan bahwa selisih pertumbuhan penduduk dari tahun ke tahun bersifat tetap, tanpa memperhitungkan pengaruh faktor eksternal seperti kelahiran, kematian, migrasi, atau perubahan sosial ekonomi yang dapat mempengaruhi dinamika pertumbuhan secara signifikan. Oleh karena itu, metode ini umumnya digunakan untuk wilayah dengan karakteristik pertumbuhan yang relatif stabil dan tidak mengalami fluktuasi besar dalam waktu dekat. Meskipun sederhana, pendekatan aritmatik memberikan estimasi awal yang berguna dalam perencanaan jangka pendek hingga menengah, terutama dalam konteks penyediaan infrastruktur dasar seperti air bersih, perumahan, dan layanan publik lainnya.

$$P_n = P_0 (1 + r n) \quad (2.5)$$

Keterangan:

P_n = Jumlah penduduk pada akhir tahun ke-n (jiwa)

P_0 = Jumlah penduduk pada tahun awal proyeksi (jiwa)

r = Angka pertambahan penduduk per tahun (%)

n = Jumlah tahun proyeksi (tahun)

b. Metode Geometrik

Penggunaan metode ini didasarkan pada dinamika pertumbuhan penduduk yang tidak selalu bersifat linear, melainkan mengalami fluktuasi seiring waktu. Pada tahap awal, laju pertumbuhan dapat mengalami penurunan, namun seiring dengan meningkatnya faktor-faktor pendorong seperti migrasi atau kelahiran, angka pertumbuhan kembali menunjukkan tren kenaikan. Fenomena ini umumnya terjadi pada wilayah dengan kepadatan penduduk yang terus meningkat hingga mendekati kapasitas maksimum yang dapat ditampung oleh suatu lingkungan atau sistem. Dalam konteks ini, metode proyeksi yang digunakan memperhitungkan adanya batas atas (*carrying capacity*), di mana jumlah penduduk akan cenderung menstabil seiring mendekati titik jenuh. Oleh karena itu, pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap kondisi pertumbuhan populasi dalam jangka panjang, terutama di wilayah yang telah mengalami tekanan demografis yang signifikan.

$$P_n = P_0 (1 + r)^n \quad (2.6)$$

Keterangan:

P_n = Jumlah penduduk pada akhir tahun ke-n (jiwa)

P_0 = Jumlah penduduk pada tahun awal proyeksi (jiwa)

r = Angka pertambahan penduduk tiap tahun (%)

n = Jumlah tahun proyeksi (tahun)

c. Metode Eksponensial

Metode eksponensial dalam perhitungan proyeksi penduduk digunakan untuk menggambarkan pola pertumbuhan populasi yang

berlangsung secara bertahap dalam jangka menengah hingga jangka panjang. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa tingkat pertumbuhan penduduk relatif konstan dari waktu ke waktu, sehingga laju peningkatan jumlah penduduk akan mengalami percepatan seiring berjalannya waktu. Dengan demikian, metode ini memungkinkan perencana atau pengambil kebijakan untuk memperoleh gambaran yang lebih realistis mengenai tren penambahan penduduk yang bersifat kumulatif dan berkelanjutan. Proyeksi berbasis eksponensial sangat bermanfaat dalam merancang kebutuhan infrastruktur, termasuk sistem penyediaan air bersih, karena dapat memperkirakan beban layanan yang akan dihadapi di masa depan berdasarkan dinamika pertumbuhan penduduk yang terus meningkat.

$$P_n = P_0 e^{r \cdot n} \quad (2.7)$$

Keterangan:

P_n = Jumlah penduduk pada akhir tahun ke- n (jiwa)

P_0 = Jumlah penduduk pada tahun awal proyeksi (jiwa)

r = Angka pertumbuhan penduduk (%)

n = Periode tahun yang ditinjau (tahun)

e = Bilangan logaritma natural ($e = 2,718281828$)

2. Proyeksi Kebutuhan Air Bersih

Proyeksi kebutuhan air bersih bagi masyarakat merupakan langkah penting dalam perencanaan sistem penyediaan air yang berkelanjutan dan efisien. Dalam melakukan proyeksi tersebut, diperlukan pendekatan yang komprehensif dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang memengaruhi tingkat konsumsi air di masa mendatang. Menurut (Sumartoro, 2013), terdapat tujuh poin utama yang dapat dijadikan sebagai dasar kajian dalam memperkirakan kebutuhan air bersih masyarakat. Ketujuh poin ini mencerminkan berbagai faktor penentu, seperti dinamika pertumbuhan penduduk, perkembangan wilayah, tingkat urbanisasi, perubahan pola konsumsi, serta kondisi sosial

ekonomi masyarakat yang terus mengalami transformasi. Kajian terhadap poin-poin tersebut tidak hanya membantu dalam menghitung estimasi volume kebutuhan air, tetapi juga menjadi panduan dalam menyusun kebijakan dan strategi penyediaan air yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dan demografi. Dengan mempertimbangkan semua elemen tersebut secara terpadu, perencanaan sistem air bersih dapat lebih akurat dan responsif terhadap tantangan kebutuhan di masa depan.

a. Kebutuhan Air Domestik

Kebutuhan air domestik merujuk pada volume air yang diperlukan untuk memenuhi aktivitas sehari-hari masyarakat dalam lingkungan rumah tangga, seperti minum, memasak, mandi, mencuci, dan kebutuhan sanitasi lainnya. Karena sifatnya yang mendasar dan mencakup hampir seluruh aspek kehidupan individu, kebutuhan air domestik umumnya menjadi komponen terbesar dalam total perencanaan kebutuhan air suatu wilayah. Oleh sebab itu, estimasi kebutuhan air domestik menjadi dasar utama dalam merancang sistem penyediaan air bersih. Perhitungan kebutuhan air domestik dilakukan dengan mengalikan jumlah penduduk yang dilayani dengan standar konsumsi air per orang per hari, yang dalam hal ini dilambangkan dengan (S). Adapun jumlah penduduk yang dilayani tidak selalu sama dengan jumlah total penduduk, melainkan dihitung berdasarkan proporsi tertentu dari populasi, sesuai dengan target cakupan layanan sistem distribusi air bersih. Proporsi ini dinyatakan dalam bentuk persentase pelayanan ($pl\%$), sehingga jumlah penduduk yang dilayani dapat diperoleh dari hasil perkalian antara total populasi dengan nilai ($pl\%$). Seluruh proses perhitungan tersebut diformulasikan dalam bentuk persamaan matematis untuk memastikan akurasi dan keterandalan hasil estimasi kebutuhan air domestik.

$$qD = Pn \times (pl\%) \times S \quad (2.8)$$

Keterangan:

qD = Kebutuhan air domestik (lt/detik atau lt/org/hr)

Pn = Jumlah penduduk saat ini (jiwa)

$pl\%$ = Presentase pelayanan yang akan dilayani

S = Standar kebutuhan air rata-rata.

b. Kebutuhan Air Non Domestik

Kebutuhan air non-domestik ditentukan melalui analisis terhadap perkembangan terbaru dari berbagai fasilitas sosial dan ekonomi yang terdapat di dalam wilayah perencanaan. Fasilitas-fasilitas tersebut mencakup institusi pendidikan, rumah sakit, tempat ibadah, perkantoran, kawasan perdagangan, serta unit-unit industri dan jasa lainnya yang tidak termasuk dalam kategori rumah tangga. Untuk memperkirakan volume kebutuhan air pada sektor non-domestik secara kuantitatif, digunakan pendekatan berbasis persentase, yakni dengan mengalikan nilai kebutuhan air domestik dengan persentase tertentu yang merepresentasikan proporsi konsumsi sektor non-domestik terhadap total konsumsi air. Metode ini digunakan karena data konsumsi aktual dari masing-masing fasilitas non-domestik seringkali sulit diperoleh secara langsung. Oleh sebab itu, pendekatan proporsional menjadi alternatif praktis yang umum diterapkan dalam perencanaan sistem penyediaan air bersih. Nilai persentase yang digunakan biasanya ditentukan berdasarkan studi terdahulu, survei lapangan, atau standar perencanaan yang telah disesuaikan dengan karakteristik wilayah setempat. Seluruh perhitungan tersebut kemudian dirumuskan ke dalam persamaan matematis untuk memperoleh estimasi kebutuhan air non-domestik secara sistematis dan terukur.

$$qnD = qD \times nD\% \quad (2.9)$$

Keterangan:

qnD = Kebutuhan air nondomestik (lt/detik atau lt/org/hr)

$nD\%$ = Presentase kebutuhan air non domestik

qD = Kebutuhan air domestik (lt/detik atau lt/org/hr).

c. Kebutuhan Air Total

Kebutuhan air total (*total water demand*) merupakan jumlah keseluruhan air yang dibutuhkan dalam suatu wilayah pelayanan, yang mencakup dua komponen utama, yaitu kebutuhan air domestik dan kebutuhan air non-domestik. Kebutuhan air domestik merujuk pada konsumsi air oleh rumah tangga untuk keperluan sehari-hari, seperti minum, memasak, mandi, mencuci, dan sanitasi. Sementara itu, kebutuhan air non-domestik mencakup penggunaan air oleh sektor-sektor di luar rumah tangga, seperti fasilitas umum, institusi pendidikan, rumah sakit, industri, serta kegiatan komersial lainnya. Perhitungan kebutuhan air total sangat penting dalam merancang kapasitas sistem penyediaan air bersih yang memadai, agar mampu memenuhi permintaan dari berbagai jenis pengguna secara simultan. Untuk memperoleh nilai kebutuhan ini secara kuantitatif, digunakan suatu persamaan yang menjumlahkan seluruh kebutuhan air domestik dengan seluruh kebutuhan non-domestik, berdasarkan proyeksi jumlah pengguna dan tingkat konsumsi masing-masing sektor.

$$qT = qD + qnD \quad (2.10)$$

Keterangan:

qT = Kebutuhan air total (lt/detik atau lt/org/hr)

qD = Kebutuhan air domestik (lt/detik atau lt/org/hr)

qnD = Kebutuhan air non domestik (lt/detik atau lt/org/hr).

d. Kehilangan Air/Kebocoran

Dalam sistem jaringan perpipaan, salah satu aspek penting yang harus diperhatikan untuk menjamin kelancaran distribusi air bersih

adalah potensi terjadinya kehilangan air atau kebocoran. Kehilangan air, yang umumnya terjadi akibat kerusakan fisik pada jaringan pipa, sambungan yang tidak kedap, ataupun pengambilan ilegal, dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem distribusi dan berpotensi menimbulkan kekurangan pasokan di hilir jaringan. Oleh karena itu, dalam perencanaan dan perancangan sistem perpipaan, estimasi kehilangan air perlu diperhitungkan secara cermat agar kapasitas sistem tetap mampu memenuhi kebutuhan riil pengguna akhir. Untuk memperkirakan volume kehilangan air dalam sistem, digunakan suatu persamaan matematis yang mengakomodasi variabel-variabel teknis tertentu, seperti panjang jaringan pipa, tekanan operasional, umur infrastruktur, dan kondisi pemeliharaan. Perhitungan ini bertujuan untuk memberikan gambaran realistis mengenai besarnya air yang tidak sampai ke pengguna karena kebocoran, sehingga dapat dijadikan dasar dalam merancang sistem distribusi yang lebih efisien dan andal.

$$qHL = qT \times (Kt\%) \quad (2.11)$$

Keterangan:

qHL = Kebocoran atau kehilangan air (lt/detik atau lt/org/hr)

qT = Kebutuhan air total (lt/detik atau lt/org/hr)

$Kt\%$ = Persentase kehilangan atau kebocoran.

e. Kebutuhan Air Rata-Rata

Kebutuhan air rata-rata (*average water demand*) merupakan besaran konsumsi air yang dihitung berdasarkan total volume air yang digunakan oleh seluruh pengguna, ditambah dengan jumlah air yang hilang akibat kebocoran atau kehilangan teknis dalam sistem distribusi. Kehilangan ini dapat terjadi karena berbagai faktor, seperti kerusakan jaringan pipa, sambungan yang tidak terdeteksi, atau sistem distribusi yang sudah tidak efisien. Oleh karena itu, perhitungan kebutuhan air rata-rata tidak hanya mencakup pemakaian aktual oleh masyarakat, tetapi juga mempertimbangkan

kehilangan air sebagai bagian integral dari estimasi kebutuhan riil. Nilai ini sangat penting dalam perencanaan sistem penyediaan air karena menjadi dasar dalam menentukan kapasitas minimal sistem yang harus disediakan untuk menjamin kontinuitas pelayanan. Untuk memperoleh nilai kebutuhan air rata-rata, digunakan suatu persamaan matematis yang menggabungkan seluruh volume kebutuhan air bersih serta tingkat kebocoran atau kehilangan air dalam sistem distribusi.

$$q_{RH} = q_T + q_{HL} \quad (2.12)$$

Keterangan:

q_{RH} = Kebutuhan air rata-rata (lt/detik atau lt/org/hr)

q_T = Kebutuhan air total (lt/detik atau lt/org/hr)

q_{HL} = Kebocoran/kehilangan air (lt/detik atau lt/org/hr).

f. Kebutuhan Air Harian Maksimum

Pada periode-periode tertentu dalam siklus mingguan, bulanan, atau tahunan, konsumsi air cenderung mengalami peningkatan melebihi tingkat rata-rata harian. Fenomena ini dikenal sebagai kebutuhan harian maksimum (*maximum daily demand*), yakni jumlah air terbesar yang dibutuhkan dalam satu hari tertentu ketika aktivitas pengguna berada pada titik puncak. Peningkatan konsumsi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti perubahan cuaca, hari libur, kegiatan musiman, atau lonjakan aktivitas domestik dan industri. Kebutuhan harian maksimum memiliki peran krusial dalam perencanaan dan desain sistem distribusi air bersih. Data ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapasitas minimum yang harus dapat ditangani oleh infrastruktur distribusi, seperti ukuran pipa, kapasitas pompa, dan volume tangki penampungan. Dengan memperhitungkan nilai maksimum harian ini, perancang sistem dapat memastikan bahwa kebutuhan masyarakat tetap dapat dipenuhi secara optimal, bahkan pada saat terjadi lonjakan konsumsi. Untuk menghitung kebutuhan ini, digunakan rumus

tertentu yang mempertimbangkan konsumsi rata-rata harian serta faktor koreksi yang merepresentasikan kecenderungan peningkatan pada hari-hari tertentu.

$$q_{max} = F \times q_{RH} \quad (2.13)$$

Keterangan:

q_{max} = Kebutuhan air hari maksimum (lt/detik atau lt/org/hr)

q_{RH} = Kebutuhan air rata-rata (lt/detik atau lt/org/hr)

F = Faktor harian maksimum.

g. Kebutuhan Air Jam Puncak

Kebutuhan air pada jam maksimum merujuk pada volume tertinggi air yang dikonsumsi dalam satuan waktu tertentu, biasanya dalam satu jam, pada kondisi ketika permintaan air berada pada tingkat maksimal. Fenomena ini dikenal sebagai kebutuhan jam puncak (*peak hour demand*), yang umumnya terjadi pada jam-jam tertentu dalam satu hari seperti pagi hari saat aktivitas domestik meningkat atau sore hari ketika kegiatan rumah tangga kembali berlangsung. Puncak konsumsi ini penting untuk dianalisis karena berdampak langsung terhadap perancangan kapasitas sistem distribusi air, seperti ukuran pipa, daya pompa, dan volume *reservoir*. Kebutuhan jam puncak tidak selalu proporsional terhadap kebutuhan harian rata-rata, karena fluktuasi aktivitas pengguna yang tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan lonjakan signifikan. Oleh karena itu, digunakan rumus khusus untuk memperkirakan kebutuhan jam maksimum sebagai dasar dalam perencanaan infrastruktur penyediaan air bersih yang andal dan berkelanjutan.

$$q_{peak} = F \times q_{RH} \quad (2.14)$$

Keterangan:

q_{peak} = Kebutuhan air jam puncak (lt/detik atau lt/org/hr)

q_{RH} = Kebutuhan air rata-rata (lt/detik atau lt/org/hr)

F = Faktor jam puncak.

Setelah diperoleh hasil perhitungan proyeksi jumlah penduduk pada tahun rencana (P_n) serta estimasi jumlah fasilitas yang akan tersedia pada periode tersebut (F_n), langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap kebutuhan air bersih wilayah yang bersangkutan. Analisis ini bertujuan untuk menentukan besarnya debit air bersih yang dibutuhkan, atau yang dikenal sebagai debit rencana (Q_r). Penentuan debit rencana sangat penting dalam merancang sistem penyediaan air bersih yang sesuai dengan kondisi masa depan, baik dari segi kapasitas maupun efisiensi operasionalnya. Untuk menghitung (Q_r), digunakan rumus tertentu yang memperhitungkan berbagai parameter, termasuk konsumsi per kapita, tingkat kehilangan air, dan faktor koreksi lainnya yang relevan dengan karakteristik wilayah yang dianalisis.

$$Q_r = (P_n \cdot q) + (F_n \cdot q) \quad (2.15)$$

Keterangan:

Q_r = Debit rencana (m^3/s)

P_n = Jumlah penduduk pada tahun rencana

F_n = Jumlah fasilitas pada tahun rencana

q = Besarnya kebutuhan air (lt/detik atau lt/org/hr)

2.9. Faktor yang Mempengaruhi Pemakaian Air Bersih

Air bersih memegang peranan yang sangat penting dalam menunjang berbagai aktivitas kehidupan, baik pada tingkat rumah tangga maupun dalam sektor industri. Di lingkungan domestik, air digunakan untuk keperluan dasar seperti minum, memasak, mandi, mencuci, dan sanitasi, sedangkan di sektor industri, air berfungsi sebagai komponen esensial dalam proses produksi, pendinginan, serta pencucian bahan baku maupun produk akhir. Seiring berjalannya waktu, kebutuhan terhadap air bersih terus mengalami peningkatan yang signifikan. Fenomena ini tidak terjadi secara acak, melainkan dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang saling berkaitan, seperti pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan industri, peningkatan standar

hidup, dan perubahan pola konsumsi masyarakat. Menurut (Viessman & Hammer, 2005), terdapat beberapa faktor utama yang memengaruhi tingkat pemakaian air oleh masyarakat dan industri. Faktor-faktor tersebut meliputi kondisi iklim, tingkat urbanisasi, karakteristik sosial ekonomi, efisiensi sistem distribusi, serta kebijakan pemerintah dalam pengelolaan sumber daya air. Pemahaman terhadap faktor-faktor ini menjadi penting dalam merumuskan strategi pengelolaan air yang adaptif dan berkelanjutan, guna menjamin ketersediaan air bersih bagi seluruh lapisan masyarakat serta menjaga keberlanjutan pembangunan di berbagai sektor.

1. Jumlah penduduk

Air merupakan elemen vital dalam hampir seluruh aktivitas kehidupan manusia, mulai dari kebutuhan domestik seperti konsumsi, sanitasi, hingga kegiatan ekonomi seperti pertanian, industri, dan jasa. Oleh karena itu, setiap aktivitas penduduk secara langsung maupun tidak langsung selalu membutuhkan pasokan air yang memadai. Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, kebutuhan akan air pun mengalami peningkatan yang signifikan. Peningkatan ini tidak hanya mencerminkan bertambahnya konsumsi individual, tetapi juga peningkatan intensitas aktivitas sosial dan ekonomi yang memerlukan air dalam jumlah besar. Jika tidak disertai dengan pengelolaan sumber daya air yang efisien dan berkelanjutan, lonjakan permintaan ini berpotensi menimbulkan tekanan terhadap ketersediaan air, baik dari segi kuantitas maupun kualitas. Maka dari itu, perencanaan penggunaan air yang berbasis data kependudukan dan proyeksi pertumbuhan menjadi sangat penting dalam upaya menjaga keseimbangan antara kebutuhan dan ketersediaan air di masa depan.

2. Keadaan Ekonomi

Pelaksanaan pembangunan berkelanjutan pada dasarnya memiliki potensi untuk memberikan dampak positif terhadap ketersediaan sumber daya air, khususnya apabila dirancang dengan mempertimbangkan aspek ekologis dan tata ruang yang berwawasan lingkungan. Pembangunan yang berkelanjutan mengedepankan keseimbangan antara kebutuhan

pertumbuhan ekonomi, sosial, dan perlindungan lingkungan, termasuk menjaga sistem hidrologi agar tetap berfungsi dengan baik. Namun demikian, apabila dalam proses pembangunan tidak disertai dengan perlindungan terhadap wilayah-wilayah resapan air, maka hal tersebut dapat menimbulkan konsekuensi serius terhadap ketersediaan air di masa mendatang. Kawasan resapan air memiliki peran penting dalam mengisi ulang air tanah dan menjaga kestabilan debit air permukaan. Ketika area resapan terganggu akibat alih fungsi lahan atau pembangunan infrastruktur yang tidak ramah lingkungan, maka kemampuan alam dalam menyimpan air menurun secara signifikan. Oleh karena itu, perencanaan pembangunan perlu dilakukan secara hati-hati dengan memperhatikan zonasi lingkungan agar tidak merusak fungsi vital dari wilayah resapan air.

3. Perlindungan lingkungan

Upaya dalam menjaga kelestarian lingkungan pada dasarnya merupakan bentuk perlindungan terhadap ekosistem alam secara keseluruhan, yang bertujuan untuk memastikan kesinambungan fungsi-fungsi ekologis yang vital bagi kehidupan manusia. Salah satu alasan utama mengapa pelestarian lingkungan menjadi sangat penting adalah karena kondisi lingkungan yang terjaga secara langsung memengaruhi kualitas dan kuantitas sumber daya air yang tersedia. Lingkungan yang rusak, seperti akibat deforestasi, pencemaran tanah, atau degradasi daerah resapan air, dapat mengurangi kapasitas alam dalam menyimpan dan menyaring air secara alami. Sebaliknya, jika ekosistem tetap lestari, maka proses hidrologi akan berjalan dengan optimal, memungkinkan air tanah dan air permukaan tetap melimpah serta bebas dari kontaminasi. Oleh karena itu, pelestarian lingkungan tidak hanya menjadi tanggung jawab etis, tetapi juga merupakan kebutuhan strategis untuk menjamin keberlanjutan sumber daya air yang esensial bagi kehidupan masyarakat.

4. Konservasi Air

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) melaksanakan upaya konservasi sebagai bagian dari strategi jangka panjang untuk menjamin

ketersediaan sumber daya air hingga masa mendatang. Konservasi ini mencakup praktik pengambilan air secara berkelanjutan, yakni dengan mempertimbangkan kapasitas daya dukung lingkungan agar tidak terjadi eksploitasi yang berlebihan. Dalam implementasinya, PDAM menerapkan prinsip-prinsip pengelolaan air yang ramah lingkungan, termasuk pengawasan terhadap volume air yang diambil dari sumber daya alam seperti mata air, sungai, atau sumur dalam. Setelah melalui proses pengolahan sesuai standar kualitas air bersih, air tersebut kemudian didistribusikan secara merata kepada masyarakat. Pendekatan ini tidak hanya memastikan terpenuhinya kebutuhan air saat ini, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem serta menjamin ketersediaannya bagi generasi mendatang. Dengan demikian, konservasi menjadi elemen integral dalam manajemen sumber daya air yang berkelanjutan.

5. Teknologi

Teknologi yang dimaksud dalam konteks ini merujuk pada penerapan peralatan dan sistem modern yang mendukung efisiensi dalam pengelolaan air. Salah satu contoh nyata yang saat ini digunakan adalah pemanfaatan pompa air oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM). Teknologi pompa ini memungkinkan PDAM untuk memproduksi serta mendistribusikan air bersih secara lebih efektif dan terjangkau kepada masyarakat. Dengan adanya sistem pemompaan, air dapat disalurkan dari sumber baik dari sumur dalam, sungai, maupun instalasi pengolahan air menuju jaringan distribusi yang menjangkau berbagai wilayah, termasuk daerah dengan topografi yang menantang. Penerapan teknologi ini tidak hanya meningkatkan kapasitas layanan PDAM, tetapi juga mempercepat proses distribusi, mengurangi ketergantungan pada metode distribusi manual, dan memastikan ketersediaan air dalam jumlah yang cukup bagi kebutuhan masyarakat sehari-hari. Oleh karena itu, teknologi pompa menjadi elemen krusial dalam mendukung kelancaran sistem pelayanan air bersih.

6. Iklim

Pada musim kemarau atau di wilayah yang memiliki iklim tropis,

kebutuhan akan pasokan air cenderung meningkat secara signifikan dibandingkan dengan daerah yang beriklim dingin. Hal ini disebabkan oleh tingginya tingkat penguapan akibat suhu udara yang lebih panas serta berkurangnya intensitas curah hujan yang menyebabkan ketersediaan air permukaan menurun drastis. Selain itu, aktivitas manusia seperti irigasi pertanian, konsumsi rumah tangga, dan kebutuhan industri turut menyumbang pada lonjakan permintaan air di kawasan tropis atau selama musim kemarau. Sebaliknya, wilayah beriklim dingin cenderung memiliki cadangan air yang lebih stabil karena rendahnya laju penguapan dan tersedianya air dari salju atau es yang mencair secara bertahap. Oleh karena itu, pengelolaan sumber daya air di daerah tropis memerlukan strategi yang lebih adaptif untuk menjaga keberlanjutan pasokan air di tengah kondisi iklim yang cenderung ekstrem.

2.10. Fluktuasi Pemanfaatan Air

Fluktuasi dalam konteks konsumsi air bersih merujuk pada variasi periodik pemakaian atau pemanfaatan air oleh konsumen, yang terjadi akibat perubahan aktivitas harian masyarakat. Variasi ini penting untuk diperhatikan dalam perencanaan sistem distribusi, karena dapat mempengaruhi kapasitas infrastruktur, khususnya dalam hal penyimpanan dan distribusi air bersih. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengakomodasi fluktuasi ini adalah dengan menghitung kapasitas optimal dari bak penampung atau *reservoir*, agar sistem mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan kebutuhan air yang tidak stabil. Menurut (Maulidya & Adelina, 2018), fluktuasi pemanfaatan air umumnya disebabkan oleh perbedaan jumlah dan pola aktivitas pengguna dari waktu ke waktu. Aktivitas masyarakat yang dinamis menyebabkan pola konsumsi air harian mengalami peningkatan atau penurunan secara signifikan, baik dalam skala jam, harian, maupun musiman. Oleh karena itu, sistem distribusi air bersih harus dirancang dengan

mempertimbangkan kebutuhan pada kondisi ekstrem, seperti hari maksimum dan jam puncak, untuk menjamin kontinuitas dan efisiensi pelayanan. Tanpa perencanaan yang mempertimbangkan fluktuasi ini, sistem berisiko mengalami kelebihan tekanan pada saat konsumsi rendah atau kekurangan pasokan pada saat konsumsi tinggi.

Dalam perencanaan sistem penyediaan air bersih, penggunaan faktor pengali menjadi langkah penting untuk menghitung variasi kebutuhan air dalam kondisi beban puncak. Dua jenis faktor pengali yang umum digunakan adalah faktor maksimum harian (f_m) dan faktor jam puncak (f_p). Kedua faktor ini digunakan untuk mengantisipasi fluktuasi konsumsi air yang terjadi sepanjang hari maupun dalam jam-jam tertentu.

1. Faktor Harian Maksimum Harian (f_m)

Faktor harian maksimum menggambarkan fluktuasi pemakaian air yang terjadi dari hari ke hari dalam satu tahun, di mana pada suatu hari tertentu tercatat tingkat konsumsi air tertinggi dibandingkan hari-hari lainnya. Hari tersebut dikenal sebagai hari maksimum, dan umumnya terjadi akibat kombinasi faktor-faktor eksternal maupun internal yang memengaruhi perilaku konsumsi masyarakat. Pemahaman terhadap faktor harian maksimum sangat penting dalam perencanaan sistem distribusi air bersih, karena menentukan kapasitas minimum yang harus mampu dilayani oleh sistem pada beban puncak. Beberapa faktor utama yang memengaruhi besarnya kebutuhan air pada hari maksimum antara lain:

a. Tingkat ekonomi dan kondisi sosial budaya

Tingkat ekonomi masyarakat merupakan salah satu faktor determinan yang memengaruhi besar kecilnya konsumsi air. Seiring dengan peningkatan kondisi sosial ekonomi, pola hidup masyarakat cenderung berubah ke arah yang lebih modern dan konsumtif, termasuk dalam hal pemanfaatan air. Artinya, semakin tinggi tingkat pendapatan atau kesejahteraan ekonomi suatu kelompok masyarakat, maka kebutuhan dan pemakaian air juga akan

meningkat. Hal ini dapat dijelaskan melalui peningkatan kepemilikan fasilitas rumah tangga seperti mesin cuci, *shower*, kolam renang, taman yang membutuhkan penyiraman rutin, serta kecenderungan penggunaan air untuk kenyamanan dan gaya hidup. Oleh karena itu, dalam perencanaan sistem distribusi air bersih, faktor ekonomi harus menjadi pertimbangan penting dalam proyeksi kebutuhan air masa depan. Wilayah dengan pertumbuhan ekonomi yang pesat umumnya menunjukkan tren konsumsi air yang terus meningkat, sehingga kapasitas infrastruktur perlu disesuaikan agar dapat menjamin layanan yang berkelanjutan dan memadai.

b. Iklim

Faktor iklim memiliki pengaruh signifikan terhadap pola fluktuasi pemakaian dan pemanfaatan air dalam suatu wilayah. Perbedaan kondisi iklim akan memengaruhi tingkat konsumsi air harian masyarakat, baik untuk kebutuhan domestik maupun non-domestik. Secara umum, pada musim kemarau atau di wilayah dengan iklim tropis yang cenderung panas dan lembap, kebutuhan air cenderung lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya aktivitas yang memerlukan penggunaan air, seperti mandi, mencuci, penyiraman tanaman, serta konsumsi langsung oleh manusia akibat peningkatan penguapan dan dehidrasi. Sebaliknya, pada wilayah dengan iklim dingin atau di musim hujan, penggunaan air cenderung lebih rendah karena kebutuhan akan pendinginan tubuh maupun kegiatan luar ruangan berkurang. Oleh karena itu, dalam proses perencanaan sistem penyediaan air bersih, pertimbangan terhadap faktor iklim sangat penting, terutama untuk menentukan kapasitas cadangan, variasi harian penggunaan, serta estimasi kebutuhan air maksimal yang mungkin terjadi dalam periode tertentu.

2. Faktor jam puncak (f_p)

Faktor jam puncak merupakan parameter penting dalam perencanaan sistem distribusi air bersih, karena mencerminkan tingkat fluktuasi

konsumsi air dalam satuan waktu tertentu. Faktor ini secara langsung dipengaruhi oleh jumlah penduduk dalam suatu wilayah pelayanan. Semakin besar jumlah penduduk yang dilayani, maka nilai faktor jam puncak cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya variasi aktivitas individu dalam kelompok populasi yang besar, sehingga pola penggunaan air menjadi lebih merata dan tidak terfokus pada waktu-waktu tertentu. Dengan kata lain, keragaman waktu penggunaan air yang tinggi dalam populasi besar akan mengurangi konsentrasi permintaan air dalam satu jam tertentu, sehingga fluktuasi antara jam puncak dan jam-jam lainnya menjadi lebih kecil. Oleh karena itu, dalam perencanaan hidraulik, daerah dengan jumlah penduduk yang lebih besar umumnya diberi faktor jam puncak yang lebih rendah dibandingkan dengan wilayah dengan populasi kecil, di mana konsumsi air lebih mudah terkonsentrasi pada waktu-waktu tertentu.

Tabel 2.4. Nilai Faktor Maksimum dan Faktor Puncak

Kategori Kota	Jumlah Penduduk	Faktor Maksimum (f_m)	Faktor Puncak (f_p)
Metro	> 1.000.000	1.1	1.5
Besar	500.000 - 1.000.000	1.1	1.5
Sedang	100.000 - 500.000	1.1	1.5
Kecil	20.000 - 100.000	1.1	1.5
Desa	< 20.000	1.1	1.5

Sumber: Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000

3. Kebutuhan Air Rata-Rata

Kebutuhan air rata-rata merupakan indikator utama dalam perencanaan sistem penyediaan air bersih, yang menggambarkan jumlah konsumsi air harian secara umum dalam kondisi normal. Nilai ini diperoleh dari penjumlahan antara kebutuhan air total, yang mencakup kebutuhan domestik (rumah tangga) dan non-domestik (seperti komersial, industri, dan fasilitas umum), dengan tambahan kehilangan air yang terjadi dalam sistem distribusi. Kebutuhan air rata-rata penting untuk dijadikan acuan

dasar dalam perhitungan kapasitas sistem, baik untuk perencanaan produksi air, dimensi pipa, maupun volume *reservoir*. Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung kebutuhan air rata-rata adalah sebagai berikut:

$$Q_r = Q_{tot} \times Q_{hL} \quad (2.16)$$

Keterangan:

Q_r = Kebutuhan air rata-rata (lt/detik atau lt/org/hr)

Q_{tot} = Kebutuhan air total (lt/detik atau lt/org/hr)

Q_{hL} = Kehilangan air (lt/detik atau lt/org/hr)

4. Kebutuhan Air Harian Maksimum

Kebutuhan air harian maksimum merujuk pada jumlah konsumsi air tertinggi yang terjadi dalam satu hari tertentu selama periode satu tahun, biasanya bertepatan dengan musim kemarau atau saat tingkat aktivitas masyarakat berada pada puncaknya. Menurut pedoman yang tercantum dalam (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), parameter ini menjadi salah satu dasar penting dalam perancangan sistem penyediaan air bersih, khususnya dalam penentuan kapasitas sistem distribusi dan volume cadangan air yang harus disiapkan. Kebutuhan air harian maksimum biasanya diperhitungkan dengan mengalikan kebutuhan air harian rata-rata dengan faktor pengali tertentu yang disesuaikan dengan karakteristik wilayah dan pola konsumsi penduduk. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung kebutuhan air harian maksimum adalah sebagai berikut:

$$Q_m = F_{hm} \times Q_r \quad (2.17)$$

Keterangan:

Q_m = Kebutuhan air maksimum (lt/detik atau lt/org/hr)

F_{hm} = Faktor harian maksimum

Q_r = Kebutuhan air rerata (lt/detik atau lt/org/hr)

5. Kebutuhan Air Jam Puncak

Kebutuhan air pada jam puncak merujuk pada jumlah konsumsi air

tertinggi yang terjadi dalam periode waktu tertentu, biasanya dalam satuan jam, yang mencerminkan beban maksimum yang harus ditanggung oleh sistem distribusi air bersih. Menurut Kriteria Perencanaan yang dikeluarkan oleh (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), perhitungan kebutuhan air pada jam puncak menjadi komponen penting dalam desain sistem jaringan distribusi, karena digunakan untuk menentukan kapasitas minimal yang harus mampu dilayani oleh sistem agar tekanan dan kontinuitas suplai tetap terjaga. Permintaan air pada jam puncak biasanya terjadi pada pagi hari dan malam hari, saat aktivitas masyarakat berada pada titik tertinggi. Untuk menghitung besarnya kebutuhan air jam puncak, digunakan pendekatan dengan faktor pengali terhadap kebutuhan rata-rata harian. Adapun rumus yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q_p = F_{jm} \times Q_r \quad (2.18)$$

Keterangan:

Q_p = Kebutuhan air pada jam puncak lt/detik atau lt/org/hr)

F_{jm} = Faktor jam maksimum

Q_r = Kebutuhan air rerata (lt/detik atau lt/org/hr)

6. Kehilangan Air/Kebocoran

Selisih antara jumlah air yang diproduksi dan jumlah air yang berhasil dikonsumsi oleh pelanggan dikenal sebagai kehilangan air (*waterloss*). Kehilangan ini dapat dikategorikan sebagai kehilangan fisik atau teknis, yang umumnya terjadi akibat kerusakan infrastruktur jaringan perpipaan. Berdasarkan (Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, 2000), batas toleransi maksimum untuk kehilangan air secara teknis berada pada kisaran 20% hingga 30% dari total air yang diproduksi. Faktor utama penyebab kehilangan air fisik ini meliputi kebocoran pada pipa transmisi, baik pada jaringan pelayanan (*service pipe*) maupun pipa induk distribusi utama. Kebocoran tersebut dapat disebabkan oleh berbagai kondisi seperti penuaan material pipa, tekanan air yang berlebihan, pergeseran tanah, sambungan yang tidak kedap air, maupun kurangnya pemeliharaan

sistem secara berkala. Oleh karena itu, pengendalian kehilangan air memerlukan strategi teknis yang komprehensif, termasuk inspeksi rutin, deteksi kebocoran secara aktif, serta penggantian infrastruktur yang sudah tidak layak guna menjaga efisiensi sistem distribusi air bersih.

2.11. Distribusi Air Bersih

Sistem distribusi air bersih merupakan suatu mekanisme penyaluran air yang dilakukan melalui jaringan perpipaan, dengan tujuan untuk menyalurkan air dari *reservoir* atau sumber penyimpanan menuju daerah pelayanan atau konsumen akhir. Sistem ini menjadi bagian vital dalam infrastruktur penyediaan air bersih, karena menentukan keberhasilan suplai air dalam hal kuantitas, kualitas, tekanan, dan kontinuitas. Secara umum, sistem distribusi air bersih terdiri dari dua komponen utama, yaitu system pengaliran dan jaringan distribusi.

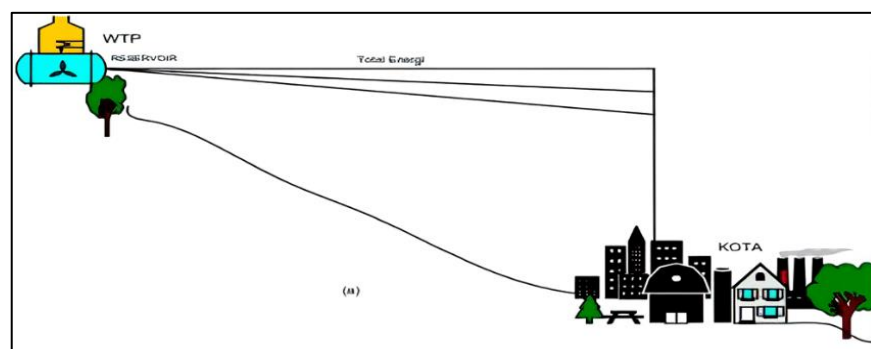
1. Sistem pengaliran

Sistem pengaliran merujuk pada sejumlah metode yang digunakan untuk mendistribusikan air dari sumber menuju area pelayanan atau konsumen. Pemilihan sistem ini sangat bergantung pada kondisi topografi wilayah, terutama perbedaan elevasi antara sumber air dan lokasi pengguna. Topografi yang bervariasi akan memengaruhi tekanan, arah aliran, serta kebutuhan energi dalam sistem distribusi air. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik geografis menjadi aspek penting dalam perencanaan jaringan perpipaan yang efisien. Menurut (Al-Layla et al., 1977), terdapat beberapa jenis sistem pengaliran yang umum diterapkan dalam sistem distribusi air, antara lain:

a. Cara Gravitasi

Distribusi air dengan sistem gravitasi merupakan metode yang memanfaatkan perbedaan elevasi antara sumber air dan wilayah pelayanan untuk menghasilkan tekanan alami dalam proses pengaliran. Sistem ini diaplikasikan ketika elevasi sumber air,

seperti *reservoir* atau bendungan, berada lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang akan dilayani. Dengan memanfaatkan gaya gravitasi, air dapat mengalir menuju konsumen tanpa memerlukan bantuan energi mekanis tambahan seperti pompa. Metode ini menjadi pilihan utama dalam kondisi geografis yang mendukung, karena mampu mempertahankan tekanan aliran secara alami dan stabil, selama perbedaan ketinggian mencukupi. Selain itu, sistem gravitasi dinilai efisien dari segi operasional, karena tidak membutuhkan konsumsi energi listrik untuk pengangkutan air, sehingga sangat cocok diterapkan dalam sistem penyediaan air bersih skala menengah hingga besar yang mengedepankan efisiensi jangka panjang. Namun, keberhasilan metode ini sangat bergantung pada perencanaan topografi yang tepat, termasuk penentuan elevasi optimal dari *reservoir* serta penyesuaian jaringan pipa terhadap kontur wilayah. Secara umum, pengaliran air secara gravitasi merupakan solusi yang efektif dan ekonomis, khususnya pada daerah dengan perbedaan ketinggian yang signifikan antara sumber dan konsumen.



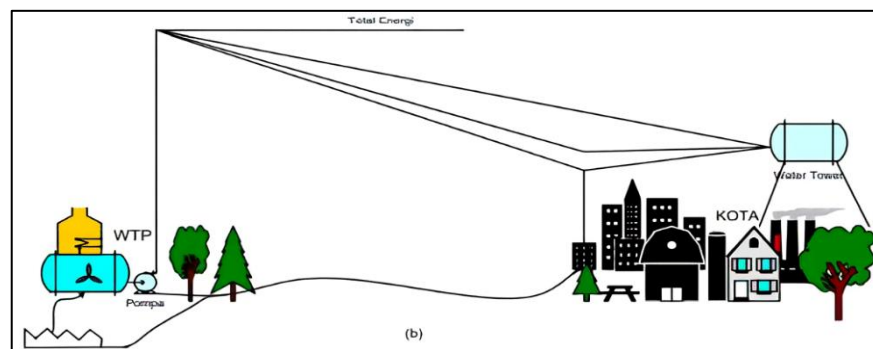
Sumber: Al-Layla dkk., 1977

Gambar 2.1. Cara Gravitasi.

b. Cara Pemompaan

Pemompaan merupakan salah satu metode yang digunakan dalam sistem distribusi air bersih, khususnya pada wilayah dengan kontur

datar atau tidak memiliki elevasi alami seperti daerah perbukitan. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan tekanan aliran guna menjamin bahwa air dari *reservoir* dapat disalurkan secara efektif hingga mencapai konsumen. Penggunaan pompa memungkinkan distribusi air menuju wilayah yang lebih tinggi atau jauh dari sumber, terutama ketika perbedaan elevasi antara sumber air dan daerah pelayanan tidak mencukupi untuk menghasilkan tekanan yang dibutuhkan melalui sistem gravitasi alami. Secara prinsip, sistem ini bekerja dengan menambahkan energi kinetik dan tekanan ke dalam aliran air melalui unit pompa, sehingga fluida dapat mengalir menanjak atau menjangkau area yang secara topografis sulit dilayani oleh sistem gravitasi saja. Selain itu, metode ini juga efektif digunakan pada saat kebutuhan tekanan air tinggi, seperti dalam sistem distribusi kawasan padat penduduk atau kawasan industri yang memerlukan tekanan stabil. Dengan demikian, penggunaan pompa menjadi solusi utama dalam mengatasi keterbatasan elevasi dan dalam memastikan kontinuitas pelayanan air bersih ke seluruh wilayah yang berada dalam jangkauan sistem.



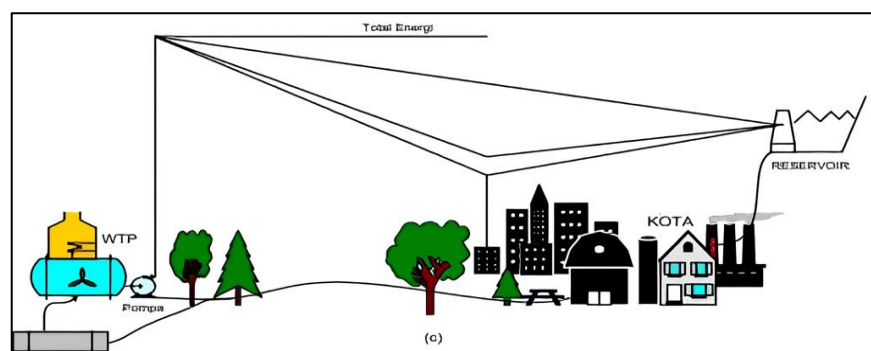
Sumber: Al-Layla dkk., 1977

Gambar 2.2. Cara Pemompaan.

c. Cara Gabungan

Metode ini merupakan kombinasi antara sistem gravitasi dan sistem pemompaan, yang dirancang untuk mempertahankan tekanan air

yang memadai, terutama dalam kondisi darurat seperti saat terjadi kebakaran atau lonjakan konsumsi air secara tiba-tiba. Sistem gabungan ini memungkinkan fleksibilitas dalam operasional jaringan distribusi, dengan memanfaatkan keunggulan dari kedua pendekatan. Dalam sistem ini, pengaliran air dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) menuju *reservoir* dilakukan melalui dua jalur transmisi, yakni menggunakan pompa dan gravitasi secara bersamaan atau bergantian, tergantung pada kondisi operasional dan kebutuhan tekanan. Penggunaan metode gabungan ini terutama ditujukan untuk menjaga tekanan minimum yang diperlukan pada saat jam puncak konsumsi air, serta memastikan kontinuitas suplai ke seluruh jaringan distribusi. Selama periode penggunaan tinggi, air dialirkan langsung ke konsumen melalui kombinasi pompa dan gravitasi untuk menjamin tekanan mencukupi. Sedangkan pada saat beban rendah, kelebihan air yang tidak terpakai akan dipompa kembali dan disimpan dalam *reservoir* distribusi, sehingga dapat digunakan kembali pada periode puncak berikutnya. Metode ini sering diimplementasikan pada sistem distribusi air skala menengah hingga besar yang membutuhkan stabilitas tekanan dan efisiensi penyimpanan dalam pengelolaan pasokan air harian.



Sumber: Al-Layla dkk., 1977

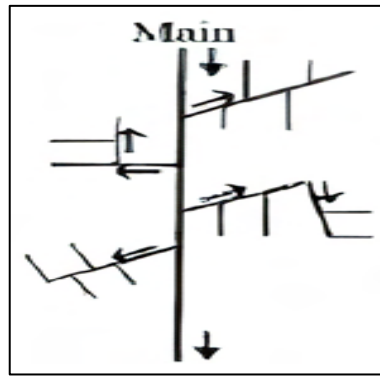
Gambar 2.3. Cara Gabungan.

2. Jaringan Distribusi

Pola jaringan distribusi mengacu pada susunan atau tata letak sistem distribusi yang digunakan untuk menyebarkan air dari produsen ke konsumen. Dalam pendistribusian air ke konsumen, dengan menggunakan jaringan distribusi pipa utama harus mendistribusikan air hingga menuju pipa pelayanan. Adapun jenis jaringan distribusi diantaranya yaitu (Al-Layla et al., 1977):

a. Sistem *Branch* (Cabang)

Sistem *branch*, atau dikenal juga sebagai sistem jaringan distribusi cabang, merupakan konfigurasi jaringan perpipaan yang dirancang untuk mengalirkan air hanya dalam satu arah, yaitu dari sumber utama menuju titik-titik pelayanan tanpa adanya jalur kembali. Aliran air dalam sistem ini berakhir pada titik ujung pipa, yang menjadikannya sebagai sistem terbuka (*open-ended system*). Sistem ini umumnya diterapkan pada wilayah dengan topografi yang memiliki kemiringan satu arah, di mana kontur medan mendukung aliran gravitasi yang efisien dari hulu ke hilir. Dalam sistem cabang, pipa utama berfungsi sebagai saluran distribusi primer, yang kemudian bercabang menjadi pipa-pipa sekunder dan tersier yang menjangkau wilayah pelayanan. Pola aliran pada sistem ini menyerupai struktur akar pohon, di mana setiap cabang membawa air dalam arah tunggal dari sumber ke pengguna akhir. Meskipun sistem ini memiliki keunggulan dari segi kemudahan perencanaan dan efisiensi biaya konstruksi, namun kelemahannya terletak pada ketidakmampuan jaringan untuk menyediakan suplai cadangan jika terjadi kerusakan atau gangguan pada salah satu jalur, karena tidak terdapat jalur alternatif untuk aliran balik. Oleh karena itu, sistem *branch* lebih sesuai untuk diterapkan di wilayah dengan kepadatan penduduk rendah atau daerah dengan konfigurasi geografis sederhana.



Sumber: Al-Layla dkk., 1977

Gambar 2.4. Sistem Cabang.

Keterangan:

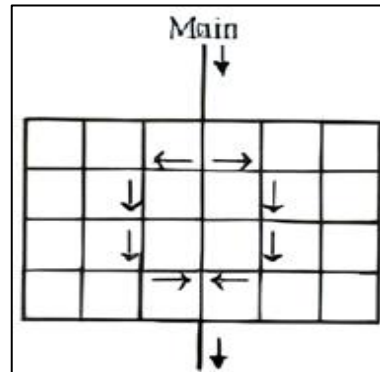
———— : Saluran Utama (Primer)

———— : Saluran Cabang (Sekunder)

b. Sistem *Loop* (Melingkar/Tertutup)

Sistem *loop*, atau yang dikenal juga sebagai sistem jaringan pipa distribusi tertutup, merupakan salah satu konfigurasi jaringan perpipaan yang umum digunakan, khususnya pada wilayah perkotaan dengan cakupan pelayanan yang luas dan kompleks. Dalam sistem ini, pipa-pipa utama terhubung satu sama lain membentuk jalur melingkar (*looped*), sehingga menciptakan hubungan dua arah dalam distribusi air. Pola ini memungkinkan air untuk mengalir melalui lebih dari satu jalur menuju titik pelayanan, yang secara signifikan meningkatkan keandalan dan kontinuitas sistem. Salah satu keunggulan utama dari sistem *loop* adalah kemampuannya dalam menciptakan keseimbangan hidraulik, karena tekanan dalam jaringan cenderung stabil dan distribusi air dapat disalurkan secara lebih merata ke seluruh wilayah pelayanan. Ketika terjadi gangguan atau pemeliharaan pada salah satu bagian pipa, sistem masih dapat berfungsi melalui jalur alternatif, sehingga gangguan distribusi dapat diminimalkan. Dengan karakteristik tersebut, sistem *loop* sangat ideal diterapkan pada lingkungan padat

penduduk yang memerlukan pasokan air berkelanjutan dengan tekanan yang relatif konstan..



Sumber: Al-Layla dkk., 1977

Gambar 2.5. Sistem Melingkar (*Loop*).

Keterangan:

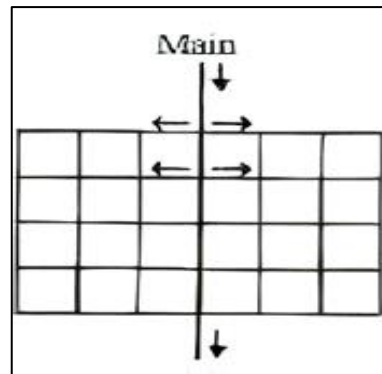
———— : Saluran Utama (Primer)

———— : Saluran Cabang (Sekunder)

c. Sistem *Grid Iron*

Sistem jaringan *grid iron* merupakan salah satu konfigurasi distribusi air yang paling umum dan luas digunakan, terutama pada wilayah perkotaan yang memiliki tata guna lahan teratur. Dalam sistem ini, pipa induk utama dan sekunder disusun membentuk pola kotak atau persegi, sehingga menciptakan jaringan yang saling terhubung secara menyeluruh. Salah satu ciri khas dari sistem *grid iron* adalah bahwa setiap ujung pipa pelayanan dihubungkan kembali ke jaringan utama, sehingga tidak ada bagian dari sistem yang terputus. Kelebihan utama dari sistem ini adalah kemampuannya dalam menjamin kontinuitas dan kestabilan aliran, karena air dapat mengalir dari berbagai arah menuju titik pelayanan. Dengan demikian, distribusi air dapat menjangkau seluruh area pelayanan secara merata, sekaligus meminimalkan risiko tekanan rendah akibat konsumsi tinggi di salah satu titik. Selain itu, sistem

ini juga memudahkan deteksi kebocoran dan perawatan jaringan karena adanya akses dari berbagai sisi. Oleh karena keandalannya dalam menjaga tekanan serta fleksibilitas dalam pengaturan distribusi, sistem *grid iron* sering dijadikan standar dalam perencanaan jaringan distribusi air modern.



Sumber: Al-Layla dkk., 1977

Gambar 2.6. Sistem Sistem *Grid Iron*.

Keterangan:

———— : Saluran Utama (Primer)

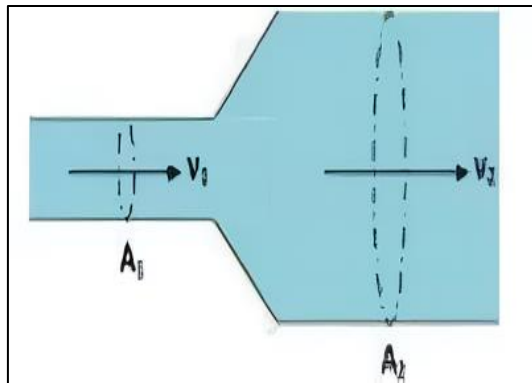
———— : Saluran Cabang (Sekunder)

Dari ketiga pola jaringan distribusi diatas PDAM Way Rilau menggunakan pola distribusi berupa sistem cabang (*branch system*) untuk pendistribusian air ke konsumen. Pola ini digunakan karena sangat cocok untuk daerah yang berkembang sehingga memungkinkan apabila terdapat penambahan konsumen di masa yang akan datang.

2.12. Dasar Hidrolika Perpipa

Hidrolika merupakan cabang ilmu teknik yang mempelajari perilaku dan karakteristik air, khususnya dalam kaitannya dengan gerak dan gaya yang ditimbulkan dalam sistem aliran, baik pada saluran terbuka maupun jaringan

perpipaan. Kajian dalam hidrolika bersifat kuantitatif, sehingga seluruh fenomena yang dianalisis harus dapat diukur secara fisik. Salah satu aspek penting yang dianalisis adalah hubungan antara debit aliran air dengan diameter pipa, yang memungkinkan pengamatan terhadap gejala teknis seperti tekanan fluida, kehilangan energi (*headloss*), serta gaya-gaya internal lainnya yang bekerja dalam sistem. Dalam konteks aliran fluida di dalam pipa, jika diameter pipa dianggap tetap dan tidak terjadi perubahan geometri, maka kecepatan aliran fluida dapat dianggap konstan. Namun demikian, sistem aliran dalam jaringan perpipaan harus senantiasa memenuhi azas kontinuitas, yaitu prinsip kekekalan massa, yang menyatakan bahwa jumlah massa air yang masuk ke dalam suatu sistem harus sama dengan jumlah massa air yang keluar, selama tidak ada kebocoran atau akumulasi di dalam sistem. Persamaan kontinuitas ini dapat dinyatakan dalam bentuk matematis sebagai berikut:



Gambar 2.7. Debit Aliran dan Persamaan Kontinuitas.

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.19)$$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2.20)$$

Dimana:

Q_1 = Debit masuk di sisi 1 (m^3/det)

A_1 = Luas penampang di sisi 1 (m^2)

V_1 = Kecepatan pada sisi 1 (m)

Q_2 = Debit keluar di sisi 2 (m^3/det)

A_2 = Luas penampang di sisi 2 (m^2)

V_2 = Kecepatan pada sisi 2 (m)

Dalam sistem aliran tertutup seperti jaringan perpipaan, berlaku prinsip kontinuitas massa, di mana debit aliran yang masuk melalui satu sisi pipa (sisi 1) akan sama besar dengan debit yang keluar di sisi lainnya (sisi 2), asalkan tidak terjadi kebocoran atau penambahan massa di sepanjang jalur aliran. Meskipun debitnya tetap, kecepatan aliran fluida dapat berbeda-beda, tergantung pada diameter pipa yang dilalui. Hal ini disebabkan oleh perubahan luas penampang lintang pipa, di mana kecepatan aliran akan menyesuaikan untuk mempertahankan debit yang konstan. Secara matematis, luas penampang lintang pipa berbentuk silinder dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Q = A \cdot V \quad (2.21)$$

$$A = \frac{\pi}{2} d^2 \quad (2.22)$$

Maka:

$$Q = \frac{\pi}{2} d^2 \cdot v \quad (2.23)$$

Dimana:

v = kecepatan aliran pipa (m/det)

A = luas penampang pipa (m^2)

D = diameter pipa (m)

π = konstanta phi $\frac{22}{7} = 3,14$

Secara umum, energi diukur dalam satuan *joule* (J) dalam sistem internasional (SI). Namun, dalam konteks analisis hidraulik, terutama pada sistem aliran fluida seperti perpipaan atau saluran terbuka, energi sering kali lebih mudah diasosiasikan sebagai tinggi kolom air (*head*), yang menyederhanakan perhitungan dan interpretasi teknis. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi energi dalam bentuk ketinggian, yang mencerminkan energi potensial suatu titik dalam sistem fluida. Energi potensial dalam fluida, yang berkaitan langsung dengan elevasi suatu titik

terhadap datum referensi, dapat dinyatakan secara matematis dengan persamaan berikut:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.24)$$

Keterangan:

E_p = Energi potensial

m = Massa

g = Percepatan gravitasi

h = ketinggian

Pada energi kinetik air yang mengalir dalam pipa dinyatakan dengan rumus sebagai berikut.

$$V = \frac{v^2}{2g} \quad (2.25)$$

Keterangan:

V = Kecepatan Air

g = Gravitasi

Energi potensial dan energi kinetik saling berhubungan pada hukum kekekalan energi, dimana:

$$E_p = E_k$$

Persamaan *Bernoulli* dapat dilihat dengan rumus sebagai berikut.

$$Z_1 + H_1 + \frac{v^2}{2g} = Z_2 + H_2 + \frac{v^2}{2g},$$

$$E_{tot1} = E_{tot2} \quad (2.26)$$

2.13. Kehilangan Tekanan

Kehilangan tekanan (*headloss*) merupakan salah satu parameter kunci dalam perhitungan hidraulik pada sistem perpipaan, karena secara langsung memengaruhi efisiensi aliran dan kebutuhan energi untuk distribusi fluida.

Headloss terjadi akibat adanya hambatan dalam aliran, baik karena gesekan dengan dinding pipa maupun gangguan geometris seperti tikungan, sambungan, dan perubahan penampang. Untuk menghitung besarnya kehilangan tekanan dalam sistem perpipaan, terdapat beberapa pendekatan matematis yang dapat digunakan, tergantung pada kondisi aliran dan karakteristik sistem. Secara umum, terdapat tiga rumus utama yang lazim digunakan dalam analisis kehilangan tekanan, yaitu Persamaan *Hazen-Williams*, yang bersifat empiris dan paling sering digunakan untuk aliran air bersih dalam pipa berdiameter besar serta kondisi aliran turbulen; Persamaan *Darcy-Weisbach*, yang lebih umum digunakan dalam berbagai jenis fluida dan memberikan hasil yang lebih akurat karena mempertimbangkan viskositas dan sifat fisik fluida; dan Persamaan *Chezy-Manning* (atau *De Chezy*), yang umumnya diterapkan untuk aliran dalam saluran terbuka, tetapi dalam kondisi tertentu juga dapat digunakan pada pipa yang tidak terisi penuh. Pemilihan rumus yang tepat sangat penting untuk menjamin akurasi perhitungan *headloss*, karena masing-masing memiliki asumsi dan keterbatasan tersendiri. Oleh karena itu, pemahaman karakteristik sistem aliran serta tujuan analisis menjadi dasar dalam menentukan metode yang paling sesuai.

2.13.1. Persamaan *Hazen Williams*

Persamaan *Hazen-Williams* menunjukkan bahwa debit aliran dalam pipa memiliki hubungan yang sebanding dengan diameter pipa. Secara khusus, dalam bentuk persamaan matematisnya, debit aliran meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya diameter pipa, karena diameter muncul dalam pangkat yang cukup besar (yakni 4,87), yang menjadikan pengaruhnya terhadap aliran sangat dominan. Oleh karena itu, pemilihan diameter pipa menjadi faktor penting dalam menentukan kapasitas aliran suatu sistem perpipaan. Dalam praktiknya, persamaan *Hazen-Williams* lebih umum digunakan untuk

menghitung kehilangan tekanan pada pipa-pipa dengan diameter relatif besar, umumnya lebih dari 100 mm. Penggunaan pada pipa berdiameter kecil (< 100 mm) cenderung menghasilkan estimasi yang kurang akurat, karena rumus ini tidak mempertimbangkan viskositas fluida secara eksplisit seperti dalam persamaan *Darcy-Weisbach*. Selain itu, persamaan *Hazen-Williams* bersifat empiris dan dikembangkan khusus untuk aliran air bersih dalam kondisi turbulen, sehingga aplikasinya terbatas untuk fluida lain atau aliran dengan karakteristik berbeda. Dengan demikian, dalam konteks perencanaan sistem distribusi air bersih berskala besar, di mana pipa-pipa yang digunakan memiliki diameter cukup besar dan alirannya didominasi oleh turbulensi, persamaan *Hazen-Williams* menjadi alat yang efisien dan praktis untuk estimasi *headloss* maupun perhitungan kapasitas aliran.

$$S = \frac{hl}{L} \quad (2.27)$$

Keterangan:

S = Kemiringan Hidrolis

hl = Kehilangan Tekanan

L = Panjang Pipa

Nilai faktor C merupakan parameter yang sangat berpengaruh dalam persamaan ini. Nilai tersebut ditentukan berdasarkan jenis material pipa seperti PVC, besi cor, baja galvanis, atau beton, serta umur dan tingkat keausan permukaan dalam pipa. Misalnya, pipa baru dari PVC biasanya memiliki nilai C yang tinggi (sekitar 150), sementara pipa logam tua dengan permukaan yang kasar bisa memiliki nilai yang jauh lebih rendah (sekitar 80–100). Oleh karena itu, pemilihan nilai C yang tepat menjadi kunci dalam memperoleh hasil perhitungan *headloss* yang akurat.

$$Q = 0,2785 \cdot c \cdot d^{2,65} \cdot s^{0,54} \quad (2.28)$$

Dimana:

L = Panjang pipa dari *node* 1 ke *node* 2 (m)

$$H_L = \frac{(Q)^{1,85}}{0,2785 \cdot C \cdot d^{2,65}} \quad (2.29)$$

Dimana:

H_L = Kehilangan Tekanan

C = Koefisien *Hazen Williams*

Tabel 2.5. Kekasaran Pipa pada Koefisien *Hazen-Williams*

No	Jenis (Material) Pipa	Nilai C Perencanaan
1	<i>Asbes Cement</i>	120
2	<i>Poly Vinil Chloride (PVC)</i>	120 - 140
3	<i>High Density Poly Ethylenen (HDPE)</i>	130
4	<i>Medium Density Poly Ethylenen (MDPE)</i>	130
5	<i>Ductile Cast Iron Pipe (DCIP)</i>	110
6	Besi Tuang, <i>Cast Iron (CIP)</i>	110
7	<i>Galvanized Iron Pipe (GIP)</i>	110
8	<i>Steel Pipe (Pipa Baja)</i>	110

Sumber: Darmasetiawan, 2001

2.13.2. Persamaan *Darcy Weisbach*

Persamaan *Darcy-Weisbach* merupakan salah satu rumus fundamental dalam mekanika fluida yang digunakan untuk menghitung kehilangan energi (*headloss*) akibat gesekan di sepanjang pipa. Persamaan ini dianggap lebih umum dan akurat, terutama untuk aliran laminar maupun turbulen, serta banyak digunakan dalam analisis aliran pada pipa berdiameter kecil (umumnya di bawah 50 mm) atau pada kondisi aliran dengan kecepatan rendah. Keunggulan utama dari persamaan ini adalah fleksibilitasnya untuk digunakan dalam berbagai jenis aliran, dengan memperhitungkan faktor gesekan sebagai parameter kunci. Secara

matematis, persamaan *Darcy-Weisbach* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H_L = \frac{f_l v^2}{D 2g} \quad (2.30)$$

Untuk menentukan suatu faktor f dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f = \frac{g}{D} \quad (2.31)$$

Dimana:

H_L = headloss (m)

f = faktor gesekan

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

v = kecepatan aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

2.13.3. Persamaan *De Chezy* dengan Koefisien *Manning*

Persamaan *De Chezy* merupakan salah satu rumus empiris yang digunakan untuk menghitung kecepatan aliran fluida dalam saluran, baik tertutup maupun terbuka. Meskipun pada prinsipnya dapat diterapkan pada sistem perpipaan, persamaan ini lebih umum digunakan pada saluran terbuka, seperti kanal, parit, atau sungai buatan. Keunggulan dari persamaan *De Chezy* terletak pada kesederhanaannya dalam menggambarkan hubungan antara kecepatan aliran, kekasaran saluran, dan kemiringan dasar saluran. Secara matematis, persamaan *De Chezy* dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2.32)$$

$$S = \frac{H_L}{L} \quad (2.33)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (2.34)$$

Dimana:

V = kecepatan aliran (m/s)

n = koefisien *Manning*

R = jari- jari hidrolis (m)

S = kemiringan dasar saluran

H_L = *headloss* (m)

L = panjang saluran (m)

A = luas penampang basah saluran (m²)

P = keliling penampang basah saluran (m)

2.14. Kehilangan Air

Perbedaan antara jumlah air yang diproduksi atau disuplai ke dalam sistem dan jumlah air yang benar-benar sampai dan dimanfaatkan oleh konsumen dikenal sebagai kehilangan air (*waterloss*). Dalam sistem distribusi air minum, keberadaan kehilangan air merupakan hal yang hampir tidak dapat dihindari, meskipun dengan sistem yang dirancang seefisien mungkin. Oleh karena itu, dalam setiap perencanaan dan evaluasi sistem penyediaan air, penting untuk melakukan perhitungan terhadap besarnya kehilangan air agar ketersediaan air bagi masyarakat tetap terjaga secara berkelanjutan. Menurut (Dirjen Cipta Karya, 2009), kehilangan air didefinisikan sebagai volume air yang hilang dalam sistem distribusi, yang disebabkan oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. Penempatan sambungan tidak tepat.
2. Pipa mengalami tekanan dari luar, yang menyebabkan kerusakan seperti retak atau pecah.
3. Pemasangan sambungan yang salah.

Kehilangan Air (*non-revenue water*) adalah hilangnya air yang seharusnya dapat dihasilkan dari sebuah sistem distribusi air, tetapi tidak dapat diukur atau dikenakan biaya karena bocor atau tidak tercatat. Kehilangan air ini bisa terjadi pada tahap pemrosesan, distribusi, dan penggunaan. Kehilangan Air umumnya terdiri dari tiga komponen, yaitu:

1. Kehilangan fisik: Kehilangan air yang terjadi pada sistem distribusi, termasuk pipa bocor, kerusakan pada katup atau meter, dan kebocoran pada tangki penyimpanan. Komponen ini dapat diperbaiki melalui perbaikan dan penggantian infrastruktur yang rusak dan penyediaan peralatan pemantauan yang lebih baik.
2. Kehilangan komersial: Kehilangan air yang terjadi karena tindakan pencurian, penggunaan air yang tidak tercatat atau pengukuran yang tidak akurat. Komponen ini dapat dikurangi melalui pengembangan sistem pengukuran yang lebih akurat dan sistem pemantauan yang ketat.
3. Kehilangan administratif: Kehilangan air yang terjadi karena kesalahan administratif dalam pencatatan penggunaan air, termasuk kesalahan dalam pencatatan meter, pengumpulan data yang tidak akurat, dan kesalahan dalam pemrosesan data. Komponen ini dapat dikurangi melalui perbaikan prosedur administratif dan pelatihan staf yang bertanggung jawab atas pencatatan dan pemrosesan data.

Kehilangan air atau yang dikenal dengan istilah *non-revenue water* (NRW) merupakan salah satu permasalahan krusial dalam pengelolaan sistem penyediaan air bersih. NRW mengacu pada volume air yang telah diproduksi namun tidak menghasilkan pendapatan karena hilang akibat kebocoran, pencurian, kesalahan pengukuran, atau faktor teknis lainnya. Tingginya tingkat kehilangan air dapat menyebabkan kerugian finansial yang signifikan bagi perusahaan penyedia air, karena biaya produksi tidak sebanding dengan jumlah air yang berhasil ditagihkan kepada pelanggan. Lebih jauh lagi, kehilangan air juga berdampak pada penurunan efisiensi sistem distribusi dan dapat mengancam ketersediaan pasokan air yang memadai bagi masyarakat, khususnya di wilayah yang memiliki keterbatasan sumber daya air. Oleh

sebab itu, upaya pengurangan tingkat kehilangan air menjadi sangat penting dalam rangka menjamin keberlanjutan sistem penyediaan air bersih, baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun lingkungan. Strategi pengendalian NRW meliputi pemantauan kebocoran secara berkala, penggunaan teknologi deteksi yang akurat, kalibrasi meter air, serta peningkatan manajemen operasional dan pemeliharaan jaringan.

2.15. Hidrolika Jaringan Pipa

1. Kecepatan Air

Kecepatan aliran air dalam pipa merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan dan evaluasi sistem distribusi air. Nilai kecepatan ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain diameter pipa, kondisi aliran (laminar atau turbulen), serta tekanan internal yang bekerja dalam sistem perpipaan. Kecepatan aliran tidak boleh dibiarkan terlalu rendah, karena aliran yang lambat berpotensi menyebabkan pengendapan partikel di dasar pipa. Endapan yang tidak terangkut oleh aliran air dalam jangka waktu tertentu akan menumpuk dan berakibat pada penyempitan diameter efektif pipa, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi distribusi air. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu tinggi juga tidak diinginkan karena dapat menyebabkan korosi, kavitasi, bahkan kerusakan struktural pada pipa akibat gesekan yang berlebihan. Selain itu, kecepatan tinggi akan meningkatkan nilai *headloss*, yang berdampak pada kebutuhan elevasi *reservoir* yang lebih besar untuk menjaga tekanan aliran tetap optimal. Untuk menghitung kecepatan aliran air dalam pipa, digunakan rumus berikut (Roberson et al., 1998):

$$Q = A \times V \quad (2.35)$$

$$Q = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times V \quad (2.36)$$

Keterangan:

Q = Debit aliran air (m^3/det)

A = Luas (m^2)

V = Kecepatan aliran air (m/det)

d = Diameter pipa (m)

2. Hukum *Bernoulli*

Hukum *Bernoulli* menyatakan bahwa dalam suatu sistem aliran fluida yang stabil (*steady flow*) dan tak termampatkan (*incompressible*) tanpa adanya gesekan yang signifikan, maka total energi fluida yang mengalir akan tetap konstan pada setiap titik sepanjang lintasan aliran. Energi total tersebut merupakan hasil penjumlahan dari tiga komponen utama, yaitu: energi potensial gravitasi, energi kinetik, dan energi tekanan. Prinsip ini didasarkan pada hukum kekekalan energi dan berlaku dalam sistem tertutup di mana tidak ada tambahan energi eksternal atau kehilangan energi internal seperti akibat gesekan dinding pipa. Secara matematis, rumusan Hukum *Bernoulli* dapat dinyatakan sebagai berikut (Yunus A. Cengel & Cimbala, 2017):

$$E_{tot} = h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma_w} \quad (2.37)$$

Keterangan:

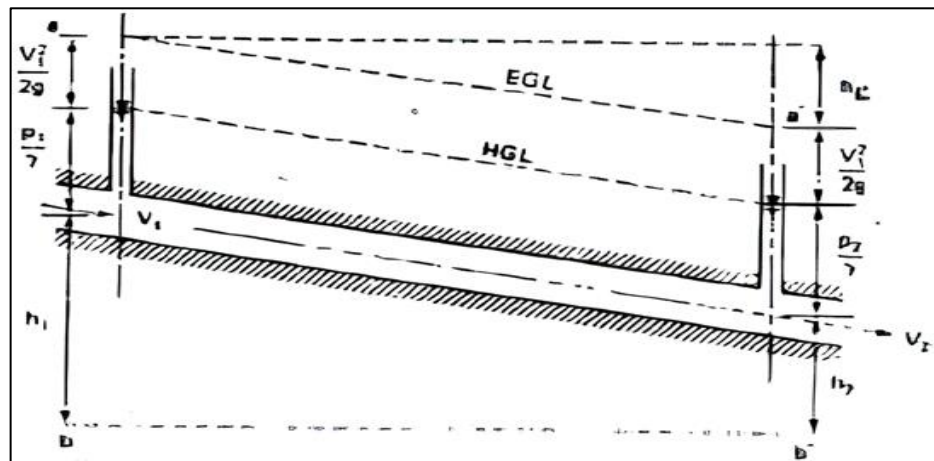
h = Energi ketinggian

$\frac{v^2}{2g}$ = Energi kecepatan

$\frac{p}{\gamma_w}$ = Energi tekanan

Berdasarkan prinsip kekekalan energi dalam Hukum *Bernoulli*, jika tidak terdapat kehilangan energi antara dua titik dalam suatu sistem aliran tertutup, maka total energi yang dimiliki fluida pada kedua titik tersebut akan tetap konstan. Artinya, dalam kondisi ideal di mana tidak terjadi gesekan, turbulensi, atau bentuk kehilangan energi lainnya, maka jumlah dari energi potensial (elevasi), energi tekanan, dan energi kinetik pada suatu titik akan sama besar dengan total energi di titik lainnya. Persamaan *Bernoulli* ini mencerminkan bahwa energi dalam sistem dialirkan dari

satu bentuk ke bentuk lain tanpa mengalami pengurangan total. Namun, dalam sistem nyata seperti jaringan perpipaan, selalu terdapat energi yang hilang akibat gesekan dan hambatan, sehingga prinsip *Bernoulli* sering digunakan dengan penyesuaian yang melibatkan istilah kehilangan energi (*head loss*). Meski demikian, dalam skenario ideal, asumsi energi total yang konstan tetap menjadi dasar utama dalam analisis sistem aliran fluida.



Sumber: Walski dkk., 2001

Gambar 2.8. Diagram Energi dan Garis Energi.

Sebagaimana ditunjukkan pada ilustrasi sebelumnya, garis kemiringan hidrolis (*hydraulic grade line*) merepresentasikan besarnya tinggi tekan (*pressure head*) dari air pada titik tertentu dalam sistem aliran. Garis ini menggambarkan ketinggian permukaan air yang akan dicapai jika tekanan dalam pipa dilepaskan ke atmosfer. Jarak vertikal antara sumbu pipa dan garis kemiringan hidrolis menunjukkan besarnya tekanan internal yang bekerja di dalam pipa pada titik tinjauan. Semakin besar jarak tersebut, semakin tinggi tekanan di dalam pipa. Sementara itu, kehilangan energi yang terjadi akibat gesekan dan faktor-faktor lain sepanjang lintasan aliran dari titik 1 ke titik 2 dapat ditunjukkan oleh penurunan elevasi garis energi total, yaitu selisih antara tinggi total (*total head*) di titik 1 dan titik 2. Konsep ini dijelaskan melalui Hukum *Bernoulli*, yang merupakan penerapan prinsip kekekalan energi pada

aliran fluida. Dalam konteks sistem tertutup seperti perpipaan, hukum ini dapat dirumuskan sebagai berikut (Yunus A. Cengel & Cimbala, 2017):

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma_w} + \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_2 = \frac{p_2}{\gamma_w} + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (2.38)$$

Keterangan:

$\frac{p_1}{\gamma_w}, \frac{p_2}{\gamma_w}$ = Tinggi tekan pada titik 1 dan 2 (m)

$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$ = Tinggi energi pada titik 1 dan 2 (m)

P_1, P_2 = Tekanan pada titik 1 dan 2 (kg/m²)

γ_w = Berat jenis air (kg/m³)

v_1^2, v_2^2 = Kecepatan aliran pada titik 1 dan 2 (m/det)

g = Kecepatan gravitasi (m/det²)

h_1, h_2 = Tinggi elevasi pada titik 1 dan 2 dari garis yang ditinjau (m)

h_L = Kehilangan energi dalam pipa (m)

3. Hukum Kontinuitas

Hukum kontinuitas merupakan prinsip fundamental dalam mekanika fluida yang menyatakan bahwa debit aliran atau volume fluida yang mengalir per satuan waktu pada suatu titik dalam sistem tertutup harus sama dengan debit di titik lain sepanjang jalur aliran, selama tidak ada penambahan atau pengurangan massa fluida dalam sistem tersebut. Hukum ini didasarkan pada azas kekekalan massa, yang menyatakan bahwa massa fluida tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan dalam sistem tertutup. Oleh karena itu, pada sistem perpipaan yang terhubung dan bebas dari kebocoran, aliran fluida harus memenuhi persamaan kontinuitas. Secara matematis, hukum kontinuitas dirumuskan sebagai berikut (White, 2011):

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2 \quad (2.39)$$

$$Q = A \times V = \text{Konstan} \quad (2.40)$$

Keterangan:

Q_1, Q_2 = Debit pada potongan 1 dan 2 (m³/det)

V_1, V_2 = Kecepatan pada potongan 1 dan 2 (m/det)

A_1, A_2 = Luas penampang pada potongan 1 dan 2 (m^2)

Pada aliran percabangan pipa juga berlaku hukum kontinuitas dimana debit yang masuk pada suatu pipa sama dengan debit yang keluar pipa.

Persamaan pipa bercabang pada hukum kontinuitas yaitu (White, 2011):

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (2.41)$$

$$A_1 \times V_1 = (A_2 \times V_2) + (A_3 \times V_3) \quad (2.42)$$

Keterangan:

Q_1, Q_2, Q_3 = Debit saat potongan 1, 2 dan 3 (m^3/det)

V_1, V_2, V_3 = Kecepatan saat potongan 1, 2 dan 3 (m/det)

A_1, A_2, A_3 = Luas penampang saat potongan 1, 2 dan 3 (m^2)

4. Kehilangan Tinggi Tekan (*Headloss*)

Kehilangan tinggi tekan, atau yang sering disebut juga sebagai *pressure headloss*, merupakan fenomena penurunan tekanan fluida yang terjadi akibat adanya gesekan antara aliran fluida dengan permukaan dalam pipa selama proses pengaliran berlangsung. Kondisi ini menyebabkan sebagian energi fluida berubah menjadi panas akibat gesekan internal dan eksternal, sehingga mengurangi tekanan total dalam sistem. Kehilangan tekanan ini tidak hanya terbatas pada jaringan distribusi air bersih, tetapi juga dapat ditemukan pada sistem saluran irigasi, instalasi pemanas, serta sistem pendingin dalam berbagai aplikasi teknik. Dalam kajian hidraulika, kehilangan tinggi tekan umumnya diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu:

a. Kehilangan Tinggi Tekan Mayor (*Major Losses*)

Kehilangan tinggi tekan mayor (*major losses*) merujuk pada kehilangan energi atau tekanan yang terjadi akibat gesekan antara fluida dengan dinding dalam pipa sepanjang jalur aliran. Selain itu, elemen-elemen dalam sistem distribusi seperti tikungan (*bend*) dan katup juga turut memberikan kontribusi terhadap besarnya kehilangan tekanan tersebut, meskipun utamanya ditinjau dalam konteks aliran sepanjang pipa lurus (Triatmodjo, 1993). Gesekan

yang terjadi menghasilkan tegangan geser, yang secara langsung menyebabkan hilangnya energi dalam bentuk penurunan tekanan atau *head*, terutama ketika aliran berlangsung dalam waktu yang lama dan melewati pipa dengan panjang signifikan. Dalam konteks penelitian ini, fokus perhitungan diarahkan pada kehilangan energi mayor (*headloss* mayor), karena dianggap sebagai komponen dominan dalam memengaruhi efisiensi distribusi air. Dengan demikian, pendekatan analitis yang digunakan dalam studi ini lebih mengedepankan model matematis untuk menghitung *headloss* mayor sebagai representasi utama dari total kehilangan tekanan dalam sistem jaringan perpipaan yang dianalisis.

Persamaan kehilangan tinggi tekan mayor menurut *Hazen-Williams* yaitu (Triatmodjo, 1993):

$$h_f = k \cdot Q^{1,85} \quad (2.43)$$

$$k = \frac{10,7 L}{C_{hw}^{1,85} \cdot d^{4,87}} \quad (2.44)$$

Keterangan:

h_f = Kehilangan tinggi tekan mayor (m)

C_{hw} = Koefisien kekasaran *Hazen-Williams*

k = Koefisien karakteristik pipa

d = Diameter pipa (m)

Q = Debit aliran pada pipa (m³/det)

L = Panjang pipa (m)

Tabel 2.6. Nilai Koefisien Kekasaran Pipa Menurut *Hazen-Williams*

No	Jenis (Material) Pipa	Nilai C Perencanaan
1	<i>Asbes Cement</i>	120
2	<i>Poly Vinyl Chloride (PVC)</i>	120 - 140
3	<i>High Density Poly Ethylenen (HDPE)</i>	130

Tabel 2.6. (lanjutan)

No	Jenis (Material) Pipa	Nilai C Perencanaan
4	<i>Medium Density Poly Ethylenen</i> (MDPE)	130
5	<i>Ductile Cast Iron Pipe</i> (DCIP)	110
6	Besi Tuang, <i>Cast Iron</i> (CIP)	110
7	<i>Galvanized Iron Pipe</i> (GIP)	110
8	<i>Steel Pipe</i> (Pipa Baja)	110

Sumber: Darmasetiawan, 2001

b. Kehilangan Tinggi Tekan Minor (*Minor Losses*)

Kehilangan tinggi tekan minor (*minor losses*) merupakan bentuk kehilangan energi dalam sistem aliran fluida yang terjadi akibat gangguan-gangguan lokal dalam aliran, seperti perubahan kecepatan, perubahan luas penampang lintang, serta perubahan konfigurasi geometri pipa. Faktor-faktor tersebut menyebabkan turbulensi lokal atau pembentukan pusaran arus yang mengganggu aliran laminar, sehingga menimbulkan peningkatan kehilangan energi. Salah satu kondisi di mana *minor losses* menjadi signifikan adalah ketika terjadi perlambatan kecepatan aliran yang disertai dengan peningkatan turbulensi akibat pemisahan aliran atau gangguan lokal lainnya. Pada sistem perpipaan berskala sedang, nilai kehilangan tinggi tekan minor ini memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap efisiensi aliran, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan hidraulik (Priyantoro, 1991). Namun demikian, pada jaringan pipa dengan rasio panjang terhadap diameter (L/D) yang jauh lebih besar dari 1.000, pengaruh dari kehilangan energi minor relatif kecil dibandingkan kehilangan energi mayor akibat gesekan dinding pipa, sehingga dapat diabaikan dalam perhitungan teknis. Oleh karena itu, untuk menggambarkan besarnya kehilangan energi minor, dapat digunakan suatu persamaan tertentu yang dirumuskan berdasarkan parameter karakteristik aliran dan

konfigurasi sistem, sebagaimana dijelaskan oleh (Triatmodjo, 1993).

$$h_f = k \frac{Q}{2A^2g} \quad (2.45)$$

$$h_f = k \frac{V^2}{2A^2g} \quad (2.46)$$

Keterangan:

h_f = Headloss minor (m)

v = Kecepatan aliran (m/det)

g = Percepatan gravitasi (m/det²)

k = Koefisien *headloss* minor

Nilai koefisien "k" dalam sistem hidraulik menunjukkan variasi yang cukup signifikan tergantung pada karakteristik fisik saluran atau komponen jaringan yang dianalisis. Koefisien ini tidak bersifat konstan, melainkan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis dan operasional. Oleh karena itu, dalam praktiknya, nilai "k" umumnya dinyatakan dalam bentuk rentang, bukan angka tetap. Hal ini dikarenakan nilai tersebut merupakan pendekatan yang dapat berubah tergantung pada beberapa aspek penting, seperti jenis dan bahan saluran, umur atau tingkat keausan pipa, kualitas pembuatan sambungan atau fitting, serta faktor manusia, baik dalam proses instalasi maupun pemeliharaan system (Triatmodjo, 1993). Dengan demikian, dalam perhitungan hidraulik, pemilihan nilai koefisien "k" harus mempertimbangkan kondisi nyata di lapangan dan tidak hanya mengandalkan nilai standar, agar hasil analisis aliran dapat mencerminkan situasi operasional secara lebih akurat dan realistis.

2.16. Kriteria Desain

Kriteria desain adalah serangkaian standar atau suatu persyaratan yang harus dipenuhi oleh sebuah desain agar dianggap efektif dalam mencapai

tujuannya. Syarat desain untuk pipa, yaitu:

1. Kualitas air: sistem perpipaan harus dirancang untuk memastikan kualitas air yang memenuhi standar dan aman untuk dikonsumsi.
2. Kapasitas pipa: pipa harus memiliki kapasitas yang cukup untuk mengalirkan air dengan kecepatan dan tekanan yang sesuai.
3. Jenis pipa: pipa yang digunakan harus tahan terhadap tekanan dan beban, serta tahan terhadap deformasi.
4. Perencanaan trase pipa: pipa harus dirancang dengan memperhatikan topografi daerah, jalur akses, jarak dari sumber air, serta kebutuhan pengguna.
5. Penggunaan katup: sistem harus dilengkapi dengan katup untuk memungkinkan pemeliharaan dan perbaikan yang mudah, serta memungkinkan isolasi sistem saat terjadi kerusakan.
6. Penggunaan pompa: pompa harus dirancang untuk memenuhi kebutuhan pengguna, mempertimbangkan kapasitas air dan tekanan yang diperlukan.
7. Penggunaan tangki: sistem harus dilengkapi dengan tangki penyimpanan yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan air selama periode pemadaman air.
8. Penggunaan bahan dan peralatan: pemilihan bahan dan peralatan harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti ketersediaan, harga, kualitas, dan keandalan.

Kriteria desain jaringan perpipaan mengacu pada (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007) yaitu:

1. Tekanan (*pressure*) 5,16 - 82,6 m
2. *Headloss* 0 - 10 m/km
3. Kecepatan aliran air (*velocity*) 0,3 - 4,5 m/s.

2.17. Teori Software Epanet

Epanet 2.2 merupakan perangkat lunak (*software*) yang dirancang khusus untuk melakukan simulasi hidraulik pada sistem jaringan perpipaan tertutup. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk menganalisis perilaku aliran air serta karakteristik distribusinya dalam jaringan secara dinamis dan terukur. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh *National Risk Management Research Laboratory* yang berada di bawah naungan *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) dan pertama kali diperkenalkan oleh (Rossman, 2000). Salah satu keunggulan utama dari *Epanet* adalah kemampuannya dalam memodelkan tidak hanya aspek hidraulik, tetapi juga kecenderungan perubahan kualitas air yang mengalir di dalam jaringan seiring waktu. Komponen-komponen yang dimodelkan dalam jaringan meliputi pipa, *node* atau titik sambungan antar pipa, pompa, katup, serta tangki dan *reservoir* yang berfungsi sebagai penyimpanan air (Wigati et al., 2015). Dengan fitur-fitur tersebut, *Epanet* menjadi alat bantu yang sangat berguna dalam proses perencanaan, evaluasi, dan optimasi sistem penyediaan air bersih, baik untuk skala kecil maupun jaringan distribusi berskala besar.



Gambar 2.9. Logo *Epanet 2.2*.

Tahap pada penggunaan *Software Epanet 2.2* untuk simulasi hidrolis sistem bersih distribusi air yaitu:

1. Gambar jaringan yang mendeskripsikan sistem jaringan atau menggunakan dasar jaringan sebagai *file text*.
2. Mengedit properties menggunakan *tools object*.
3. Menyimulasikan bagaimana suatu sistem beroperasi dengan cara menggambarannya.
4. Memilih jenis tipe analisis yang akan dipakai.
5. Melakukan analisis hidrolis dengan menggunakan *tools* jalankan (*run*).
6. Analisis dari *software* dapat dilihat pada hasil *running*.

Beberapa kemampuan *Software Epanet 2.2* sebagai alat bantu analisis hidrolis yaitu:

1. Kemampuan analisis yang luas dan tak terbatas
2. Persamaan *Hazen-Williams* untuk menentukan kekasaran pipa *headloss* untuk *bend*, *fitting*, dan sebagainya.
3. Dapat menghitung energi pada pompa
4. Variasi pada tipe dari *valve* termasuk *shiftof*, *check*, *pressure regulating*, dan *flow* kontrol *valve* dapat dilakukan pemodelan.
5. Bentuk, diameter dan tinggi dari tangki bervariasi.
6. Memungkinkan untuk memasukan kategori kebutuhan (*demand*) ganda pada *node*.
7. Model tekanan bergantung oleh aliran yang keluar dari *emitter* (*sprinkler head*).
8. Dapat melakukan pengoperasian sistem dasar tangki sederhana dan kontrol waktu yang lebih kompleks.

Pada prinsipnya, penggunaan *Software Epanet 2.2* dalam simulasi jaringan distribusi air memerlukan data input yang akurat dan sesuai dengan kondisi aktual sistem yang dianalisis. Kesesuaian data ini menjadi faktor penentu terhadap keandalan hasil simulasi, karena setiap parameter *input* akan memengaruhi perhitungan hidraulik dan interpretasi performa jaringan secara

keseluruhan. Dengan memasukkan data yang valid, perangkat lunak ini dapat menghasilkan output yang dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi sistem, mendeteksi permasalahan operasional, serta memberikan dasar dalam pengambilan keputusan teknis. Adapun beberapa parameter utama yang perlu dimasukkan ke dalam *Epanet 2.2* meliputi:

1. Data Input

Data input adalah informasi atau data yang dimasukkan ke dalam sebuah sistem untuk melakukan suatu proses tertentu. Dalam konteks simulasi jaringan pipa air dengan menggunakan *software* seperti *Epanet 2.2*, data *input* dibutuhkan untuk membangun model jaringan pipa dan mensimulasikan aliran air pada jaringan pipa tersebut yaitu:

Tabel 2.7. Data Input *Epanet 2.2*

No	Data Input	Satuan	Rencana Sumber Data
1	Elevasi Eksisting	m	Perumda Air Minum Way Rilau
2	Diameter Pipa	mm	
3	Panjang Pipa	m	
4	Peta Jaringan	bmp/wmf	
5	Koefisien Kekasaran Pipa		
6	Pompa (Jika Sistem Pompa)		
7	Kebutuhan Air Tiap Sambungan	l/s	
8	Fluktuasi Pemakaian Air	l/s	
9	Data Tekanan Lapangan	Psi/Bar	

Sumber: Detail Engineering Design (DED) Proyek SPAM, 2024

2. Data Output

Data *output* adalah hasil atau informasi yang dihasilkan dari suatu proses atau tugas yang dilakukan oleh suatu sistem atau perangkat lunak. Dalam konteks simulasi jaringan pipa air dengan menggunakan *Software Epanet 2.2*, data *output* yang dihasilkan yaitu:

Tabel 2.8. Data Output Epanet 2.2

No	Data Output	Kriteria	Satuan	Rencana Sumber Data
1	Kecepatan Aliran Pipa (Velocity)	0,3 - 4,5	m/s	Data Output Software Epanet 2.2
2	Tekanan (Pressure)	5,16 – 82,6	m	
3	Kehilangan Energi (Headloss)	0 - 10	m/km	

Sumber: Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007

Manfaat dari *Software Epanet 2.2* yaitu (Rossman, 2000):

1. *Software* ini dirancang untuk mengetahui bagaimana pergerakan aliran air perkembangannya.
2. *Software* ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dari analisis dan macam- macam sistem distribusi, detail dari desain, dan model kalibrasi hidrolik.
3. *Software* ini bisa membantu mempermudah dalam menentukan alternatif sistem jaringan pipa dan strategis manajemen.

2.17.1. Analisis Algoritma Epanet

Analisis algoritma *Epanet* melibatkan penggunaan algoritma yang telah dioptimalkan untuk memodelkan pergerakan air dan zat di dalam sistem jaringan pipa air dan sanitasi. Algoritma tersebut menggunakan model matematika yang sangat kompleks dan mempertimbangkan berbagai faktor, seperti tekanan, laju aliran, debit, suhu, dan komponen kimia lainnya.

Epanet menggunakan metode iteratif untuk memecahkan persamaan matematika yang terlibat dalam model simulasi. Metode iteratif ini

menggabungkan algoritma simulasi dengan algoritma optimasi untuk mencari solusi terbaik dalam waktu yang lebih cepat dan efisien.

Pada dasarnya, analisis algoritma *Epanet* digunakan untuk mengoptimalkan sistem jaringan pipa air dan sanitasi sehingga dapat berfungsi dengan lebih efisien dan efektif. Program ini juga bisa dimanfaatkan untuk mengidentifikasi jika ada masalah dalam sistem jaringan pipa air dan sanitasi, seperti kebocoran, tekanan rendah, masalah kualitas air, dan memberikan solusi untuk mengatasinya. Beberapa analisis algoritma *Software Epanet* yaitu:

1. Kecepatan Aliran Air (*Velocity*)

Dalam algoritma *Software Epanet*, kecepatan aliran (*velocity*) dalam pipa dihitung menggunakan rumus dasar hidrolika. Berikut adalah rumus umum untuk menghitung kecepatan aliran dalam algoritma *Epanet 2.2*.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.47)$$

Keterangan:

V = Kecepatan aliran (m/s)

Q = Debit aliran (l/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

Epanet menggunakan penyesuaian aliran rendah (*Low Flow Adjustment*) adalah suatu teknik yang digunakan dalam analisis sistem jaringan pipa air untuk memperkirakan aliran air minimum yang diperlukan agar sistem tetap beroperasi dengan baik. Teknik ini berguna terutama pada kondisi saat permintaan air sangat rendah, seperti di malam hari atau pada musim penghujan. Dengan menggunakan teknik ini, dapat dipastikan bahwa sistem pipa air tetap beroperasi dengan baik dan memberikan pelayanan air yang memadai, bahkan pada saat permintaan air yang rendah.

2. Model Permintaan yang Bergantung pada Tekanan

Model permintaan yang bergantung pada tekanan (*Pressure-Dependent Demand Model*) adalah model matematika yang digunakan untuk memperkirakan hubungan antara tekanan dan permintaan dalam sistem jaringan pipa air. Model ini menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan dalam pipa air, semakin tinggi permintaan air yang dibutuhkan oleh konsumen.

Model permintaan yang bergantung pada tekanan sering digunakan dalam simulasi jaringan pipa air karena tekanan air dapat mempengaruhi aliran air, kecepatan, dan kualitas air. Model ini memperhitungkan berbagai faktor yang dapat mempengaruhi permintaan air, seperti ukuran pipa, ketinggian bangunan, dan kebutuhan air. Beberapa rumus matematika yang digunakan dalam Model Permintaan yang Bergantung pada Tekanan adalah sebagai berikut:

$$qD_i = \begin{cases} D_i & p_i \geq p_f \\ D_i \left(\frac{P_i - P_0}{P_f - P_0} \right)^{1/e} & p_0 < p_i < p_f \\ D_i & p_i \leq p_f \end{cases} \quad (2.48)$$

Keterangan:

D_i = Permintaan normal penuh pada simpul i ketika tekanan p_i sama atau melebihi P_f ,

P_0 = Tekanan di bawah permintaan 0,

$1/e$ = Eksponen fungsi tekanan yang biasanya ditetapkan sama dengan 0,5

Headloss h_{LD} dan gradiennya g_D melintasi tautan permintaan virtual dapat dievaluasi sebagai berikut (dengan subskrip simpul ditekan untuk kejelasan):

a.

$$g_D = R_{High} \quad (2.49)$$

$$h_{LD} = P_f - P_0 + R_{High} (q_D - D) \quad (2.50)$$

b. Jika aliran permintaan saat ini q_D kurang dari nol:

$$h_{LD} = R_{High} \quad (2.51)$$

c. Jika tidak, bagian fungsi daya dari persamaan *Wagner* terbalik digunakan untuk mengevaluasi kehilangan *head* dan gradien:

$$g_D = e R_D q_D^{e-1} \quad (2.52)$$

$$h_{LD} = g_D q_D^{1/e} \quad (2.53)$$

3. Kehilangan Energi (*Headloss*)

Perhitungan *headloss* dalam *Software Epanet* dilakukan melalui pendekatan iteratif yang melibatkan serangkaian langkah numerik untuk menyelesaikan sistem persamaan *non-linier* yang kompleks. Proses ini bertujuan untuk menentukan distribusi tekanan dan laju aliran yang seimbang di seluruh elemen jaringan, sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi hidraulik secara akurat. Pendekatan iteratif ini biasanya berbasis pada metode *Newton-Raphson* atau teknik serupa yang digunakan untuk mencari solusi konvergen dalam sistem aliran tertutup. Adapun tahapan umum dalam proses perhitungan *headloss* pada *Epanet* mencakup:

- a. Inisialisasi: Menentukan keadaan awal sistem, termasuk tekanan dan aliran awal di setiap simpul dan pipa jaringan perpipaan.
- b. Iterasi: Melakukan iterasi berulang untuk mencapai konvergensi solusi. Langkah-langkah iterasi ini melibatkan langkah-langkah berikut:
 - (1) Menghitung aliran dalam pipa: Menggunakan persamaan hidrolik (seperti persamaan *Hazen-Williams* atau *Darcy-Weisbach*) untuk menghitung aliran dalam setiap pipa

berdasarkan tekanan saat ini di kedua ujung pipa.

- (2) Menghitung *headloss* dalam pipa: Menggunakan persamaan *headloss* (seperti persamaan *Hazen-Williams* atau *Darcy-Weisbach*) untuk menghitung *headloss* dalam setiap pipa berdasarkan aliran dalam pipa dan karakteristik hidrolis pipa.
 - (3) Menghitung tekanan di simpul: Menggunakan persamaan keseimbangan energi (hukum *Bernoulli*) untuk menghitung tekanan di setiap simpul berdasarkan aliran yang masuk dan keluar dari simpul tersebut, serta *headloss* dalam pipa yang terhubung dengan simpul tersebut.
 - (4) Mengevaluasi konvergensi: Memeriksa perbedaan antara tekanan saat ini dan tekanan sebelumnya di setiap simpul atau aliran. Jika perbedaan tersebut memenuhi kriteria konvergensi yang ditentukan (misalnya, perbedaan kurang dari suatu ambang batas), maka iterasi dihentikan.
 - (5) Update tekanan: Jika konvergensi belum tercapai, tekanan saat ini di setiap simpul diperbarui dengan tekanan yang dihitung sebelumnya, dan langkah-langkah iterasi diulang.
- c. *Output*: Setelah iterasi konvergen, hasil akhir berupa tekanan yang stabil di setiap simpul dan *headloss* dalam setiap pipa dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut atau tujuan lainnya. Algoritma *Epanet* memungkinkan perhitungan *headloss* yang akurat dalam sistem perpipaan yang kompleks dengan berbagai tipe pipa dan karakteristik hidrolis yang berbeda. Proses iteratif yang dilakukan oleh algoritma ini memastikan bahwa *headloss* dan kondisi hidrolis mencapai keseimbangan dalam sistem.

2.17.2. Kalibrasi *Root Mean Square Error (RMSE)*

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan salah satu metrik evaluasi yang paling umum digunakan dalam analisis statistik maupun pemodelan numerik untuk menilai sejauh mana hasil prediksi suatu model mendekati nilai observasi atau data aktual. RMSE dihitung dengan mengambil akar dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai yang diprediksi oleh model dan nilai sebenarnya dari data. Metrik ini memberikan gambaran yang jelas mengenai besar kesalahan prediksi, di mana nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan tingkat akurasi model yang lebih tinggi. Karena melibatkan kuadrat selisih, RMSE sangat sensitif terhadap kesalahan besar (*outlier*), sehingga cocok digunakan untuk mendeteksi ketidaksesuaian signifikan antara model dan data aktual. Bersama dengan RMSE, nilai *Mean Error (ME)* juga sering dihitung untuk memberikan perspektif lain mengenai kecenderungan kesalahan model, apakah cenderung *overestimate* atau *underestimate*. Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung *Mean Error* dan RMSE secara matematis dijelaskan oleh (Moriassi et al., 2007) sebagai berikut:

$$\text{Mean Error} = \frac{A_t - F_t}{n} \quad (2.54)$$

$$\text{RSME} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (2.55)$$

Keterangan:

A_t = Nilai data lapangan (m)

F_t = Nilai pada hasil permodelan (m)

n = Banyaknya jumlah data

Dalam proses kalibrasi data, salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur tingkat keakuratan hasil prediksi adalah *Root Mean Square Error (RMSE)*. Metode ini mengukur rata-rata kuadrat dari

selisih antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual. Semakin kecil nilai RMSE yang diperoleh terutama jika mendekati nol semakin tinggi tingkat akurasi dari model prediktif yang digunakan. Artinya, model tersebut mampu merepresentasikan data aktual dengan kesalahan yang minimal. Selain RMSE, proses evaluasi model juga sering disertai dengan perhitungan koefisien korelasi, yang memiliki rentang nilai dari -1 hingga +1. Nilai koefisien korelasi ini tidak hanya menunjukkan seberapa kuat hubungan antara dua variabel yang diuji, tetapi juga arah hubungan tersebut. Koefisien dengan nilai 0 menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan linier antara kedua variabel. Sebaliknya, tanda positif (+) mengindikasikan adanya hubungan searah, di mana peningkatan pada satu variabel cenderung diikuti oleh peningkatan pada variabel lainnya. Sedangkan tanda negatif (−) menunjukkan hubungan yang berlawanan arah, artinya jika satu variabel meningkat, variabel lainnya cenderung menurun (Sujarweni, 2014). Dengan demikian, kombinasi antara nilai RMSE dan koefisien korelasi dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai performa dan validitas suatu model prediksi dalam analisis data kuantitatif.

Banyaknya data yang digunakan pada kalibrasi data bervariasi tergantung pada kompleksitas data, tujuan dan jenis metode yang digunakan. Namun semakin banyak data pembanding yang digunakan untuk kalibrasi maka akan semakin tinggi tingkat akurasi (Meeker & Escobar, 1998).

2.17.3. Katup

Katup merupakan suatu perangkat mekanis yang berfungsi untuk mengatur aliran fluida (seperti air, gas, atau cairan lainnya) dengan membuka, menutup, atau mengatur sejauh mana aliran dapat

melewati. Katup digunakan untuk berbagai tujuan dalam sistem perpipaan, termasuk pada sistem jaringan perpipaan untuk PDAM Way Rilau. Beberapa jenis-jenis dari katup yang ada dalam *Software Epanet 2.2* yaitu:

1. Katup Pengurang Tekan atau *Pressure Reducing Valve* (PRV)
 Katup ini berfungsi untuk mengurangi tekanan fluida dari tingkat yang lebih tinggi menjadi tingkat yang lebih rendah. PRV beroperasi dengan asumsi bahwa aliran pipa kapiler dapat dikontrol untuk menjaga tekanan air tetap stabil. Setiap PRV berisi dua regulator, tekanan maksimum diatur oleh pengatur pertama dan tekanan air minimum diatur oleh pengatur kedua. Regulator pertama mengontrol tingkat tekanan air tertinggi yang diinginkan sedangkan regulator kedua adalah untuk mengontrol ketinggian air minimum yang dibutuhkan.
2. Katup Penopang Tekan atau *Pressure Safety Valve* (PSV)
 Katup ini berfungsi untuk membuka secara otomatis untuk melepaskan tekanan berlebih dan melindungi sistem dari tekanan yang berlebihan. Katup ini digunakan untuk sistem-sistem di mana perlu ada perlindungan terhadap lonjakan tekanan yang dapat merusak peralatan.
3. Katup Pemutus Tekan atau *Pressure Break Valve* (PBV)
 Katup ini berfungsi untuk membuka untuk mengurangi tekanan secara tiba-tiba dan mencegah peningkatan tekanan berlebih pada sistem. Katup ini digunakan untuk melindungi sistem perpipaan dari peningkatan tekanan yang tidak diinginkan, seperti dalam situasi kebakaran.
4. Katup Kontrol Aliran atau *Flow Control Valve* (FCV)
 Katup ini berfungsi untuk mengatur laju aliran fluida dalam pipa. Katup ini digunakan untuk menjaga aliran konstan dalam sistem perpipaan, membantu dalam pengendalian proses, dan menjaga kestabilan sistem.

5. Katup Kontrol *Throttle* atau *Throttle Control Valve* (TCV)

Katup ini berfungsi untuk mengatur atau mengurangi aliran fluida dalam sistem. Katup ini digunakan untuk mengendalikan laju aliran, seringkali diterapkan pada sistem-sistem yang membutuhkan pengaturan presisi.

6. Katup Tujuan Umum atau *General Purpose Valve* (GPV)

Katup ini berfungsi sebagai katup serbaguna yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan.

Pada DMA G26 Kelurahan Sukabumi ini jenis katup yang digunakan yaitu *Pressure Reducing Valve* (PRV) karena Sesuai dengan fungsinya dapat mengurangi tekanan fluida dari tingkat yang lebih tinggi menjadi tingkat yang lebih rendah dan dapat digunakan untuk menjaga tekanan air dalam sistem perpipaan. Sehingga berdasarkan permasalahan tekanan pada jaringan pipa PDAM Way Rilau yang relatif tinggi akan sangat sesuai apabila katup PRV diaplikasikan.

2.18. Tahap Penggunaan *Epanet* 2.2

2.18.1. Analisis Jaringan Pipa Menggunakan *Software Epanet* 2.2

Dalam penelitian ini, digunakan *Software Epanet* 2.2 sebagai alat bantu simulasi untuk menganalisis data hidraulik dalam sistem jaringan distribusi air. *Epanet* merupakan aplikasi berbasis komputer yang dirancang untuk melakukan simulasi hidraulika serta memodelkan dinamika kualitas air yang mengalir dalam jaringan perpipaan tertutup. Jaringan tersebut terdiri atas berbagai komponen, termasuk pipa, *node* atau titik koneksi, tangki, serta *reservoir*. Program ini memungkinkan pengguna untuk memantau dan menganalisis perilaku aliran air dalam setiap segmen pipa selama

rentang waktu tertentu, dengan memperhitungkan variabel-variabel teknis secara dinamis. *Epanet* dikembangkan oleh *Water Supply and Water Resources Division* dari *National Risk Management Research Laboratory*, yang berada di bawah naungan *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). Versi awal perangkat lunak ini diperkenalkan pada tahun 1993, dan pembaruan signifikan dirilis pada tahun 1999 (Rossman, 2000). Dalam penggunaannya, model *EPANET* 2.2 memerlukan sejumlah parameter *input* untuk menjalankan simulasi secara akurat. Parameter-parameter tersebut antara lain mencakup kebutuhan air (*demand*) di masing-masing *node*, elevasi titik-titik jaringan, panjang pipa, diameter pipa, serta koefisien kekasaran permukaan bagian dalam pipa. Keseluruhan *input* ini berperan penting dalam membentuk representasi sistem yang mendekati kondisi nyata, sehingga hasil simulasi dapat dijadikan dasar untuk analisis teknis dan pengambilan keputusan yang lebih akurat.

Analisis terhadap sistem jaringan perpipaan merupakan langkah krusial dalam proses evaluasi sistem distribusi air bersih, terutama untuk menilai kelayakan teknis jaringan eksisting. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah infrastruktur perpipaan yang ada masih mampu berfungsi secara optimal dalam memenuhi kebutuhan distribusi air, atau justru memerlukan tindakan perbaikan. Salah satu indikator penting dalam evaluasi tersebut adalah kecocokan dimensi pipa dengan kebutuhan aktual; dimensi pipa yang digunakan tidak boleh melebihi ukuran yang diperlukan, karena hal tersebut dapat menyebabkan inefisiensi aliran maupun pemborosan sumber daya. Dengan melakukan analisis jaringan distribusi air bersih secara menyeluruh, dapat diidentifikasi apakah sistem masih sesuai dengan kriteria teknis yang telah ditetapkan dalam (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air

Minum, 2007). Apabila ditemukan bahwa jaringan perpipaan tidak memenuhi standar tersebut, maka perlu dilakukan penyesuaian atau perbaikan berdasarkan jenis permasalahan yang dihadapi, baik dari aspek teknis, hidraulik, maupun operasional. Dalam proses analisis ini, terdapat sejumlah aspek penting yang harus diperhatikan agar evaluasi sistem distribusi air bersih dapat dilakukan secara akurat dan menyeluruh, antara lain:

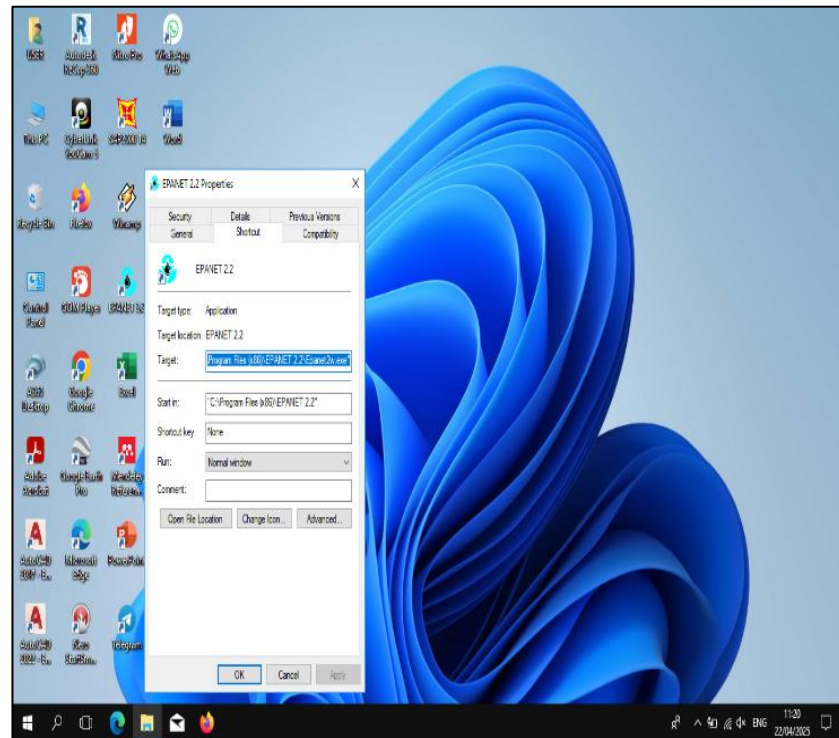
1. Peta jaringan distribusi perpipaan eksisting.
2. Kerangka induk untuk pipa.
3. Daerah pelayanan dan titik pelayanan (*junction points*).
4. Data kebutuhan air untuk menentukan *base demand*.
5. Data pipa.
6. Elevasi dari pipa eksisting.
7. Gambar seluruh sistem.

2.18.2. Langkah-Langkah Pengoperasian *Epanet 2.2*

Dalam pengoperasian *Epanet 2.2* ada beberapa langkah yang harus dilakukan, diantaranya:

1. Langkah pertama dalam pengoperasian *Software Epanet 2.2* adalah menjalankan program melalui sistem operasi yang digunakan. Pengguna dapat memulai dengan mengakses menu **Start**, kemudian memilih opsi **Program** dan selanjutnya membuka aplikasi **EPANET 2.2**. Tindakan ini akan menampilkan antarmuka utama dari perangkat lunak, yang menjadi titik awal dalam melakukan pemodelan jaringan distribusi air. Tahap inisialisasi ini penting karena dari sinilah seluruh proses pengaturan awal, *input* data, dan konstruksi sistem perpipaan dilakukan. Pastikan bahwa instalasi perangkat lunak telah dilakukan dengan benar sebelumnya agar seluruh fitur dan fungsi dapat berjalan tanpa gangguan teknis. Dengan memulai program

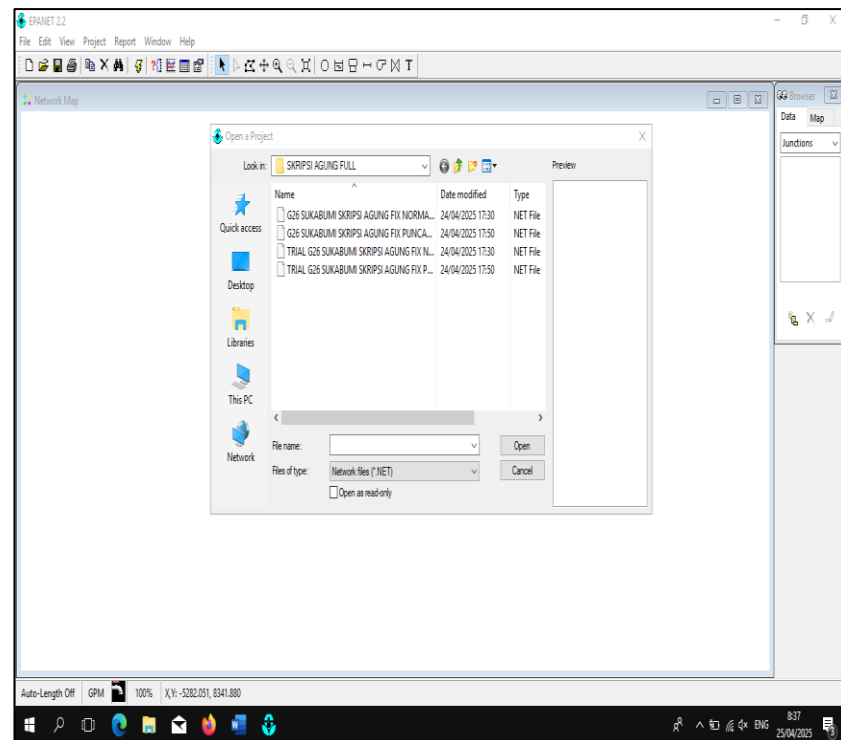
secara tepat, pengguna dapat segera melanjutkan ke tahapan berikutnya, seperti pembukaan *file* proyek, pengaturan parameter, hingga pembangunan model jaringan secara keseluruhan.



Gambar 2.10. Menjalankan *Software Epanet 2.2*.

2. Langkah awal dalam memulai proses pemodelan jaringan perpipaan menggunakan perangkat lunak adalah dengan menentukan status *file* kerja yang akan digunakan. Apabila pengguna belum memiliki file proyek sebelumnya, maka dapat memilih menu **File** → **New** untuk membuat dokumen proyek baru dari awal. Pilihan ini memungkinkan pengguna menyusun seluruh komponen jaringan, mulai dari penempatan *node* hingga pengaturan parameter hidraulik, secara bertahap dan terstruktur. Sebaliknya, apabila *file* proyek telah tersedia dari proses kerja sebelumnya, pengguna dapat memilih menu **File** → **Open** untuk membuka dan melanjutkan pengolahan data yang telah tersimpan. Fungsi ini sangat berguna dalam penelitian atau perencanaan

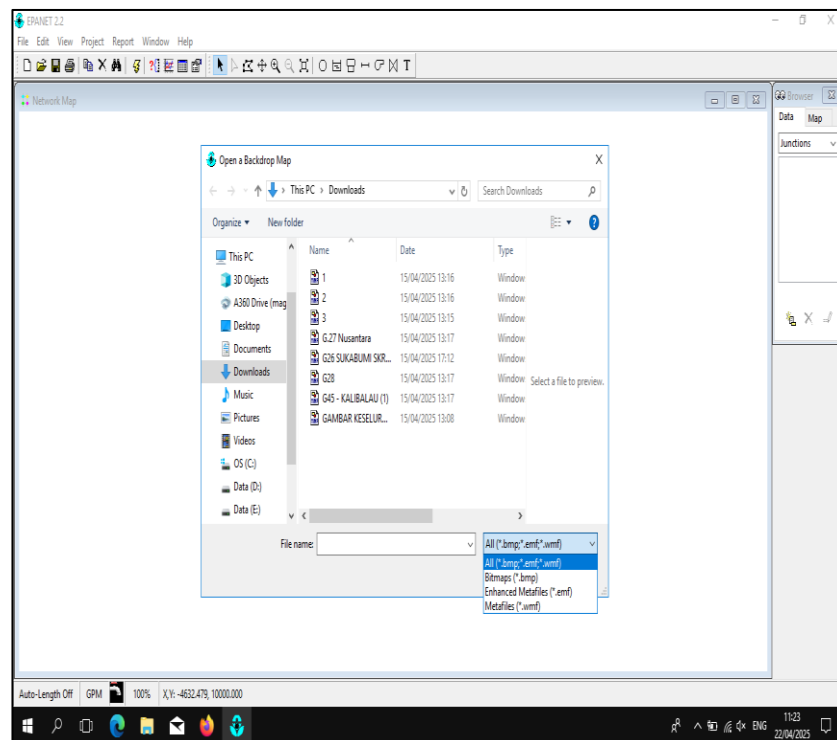
yang dilakukan secara bertahap, karena memungkinkan modifikasi dan analisis lanjutan tanpa perlu memulai dari awal. Pemilihan antara membuat *file* baru atau membuka *file* lama menjadi titik awal penting yang menentukan arah kerja selanjutnya dalam pemodelan sistem distribusi air.



Gambar 2.11. Membuka Lembar Kerja.

3. Dalam pemodelan jaringan perpipaan menggunakan perangkat lunak hidraulik seperti *Epanet*, penggunaan peta dasar atau *backdrop* sangat penting sebagai referensi spasial dalam penempatan elemen-elemen jaringan. File gambar yang digunakan sebagai *backdrop* harus memiliki format yang didukung oleh perangkat lunak, yaitu **BMP (Bitmap) atau WMF (Windows Metafile)**. Kedua format ini mampu mempertahankan kualitas visual yang memadai serta kompatibel untuk ditampilkan sebagai latar belakang dalam jendela kerja simulasi. Oleh karena itu, sebelum memuat gambar peta dasar ke dalam sistem, penting

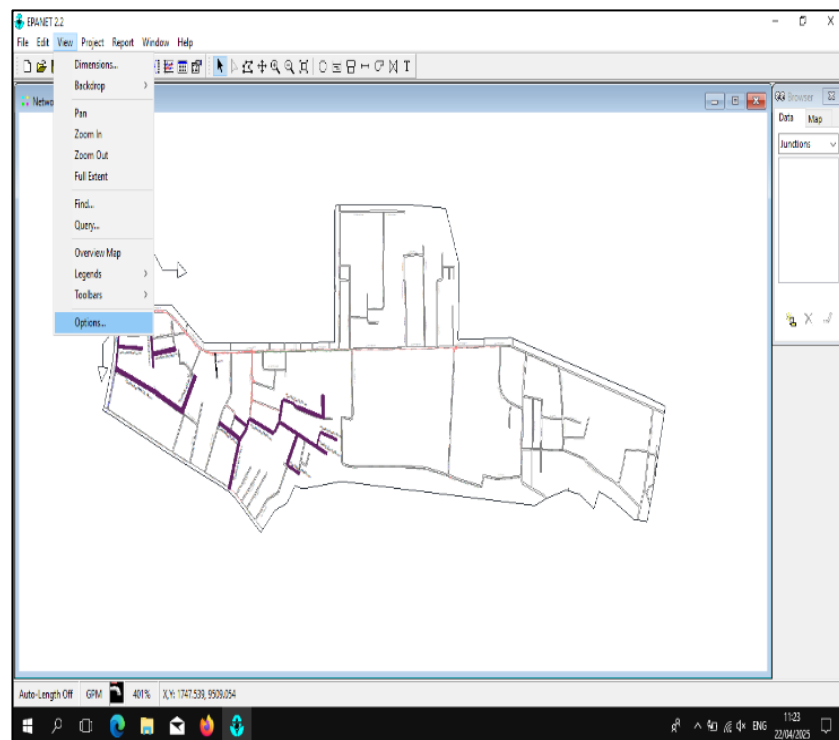
format yang kompatibel, seperti *JPEG*, *PNG*, atau *BMP*. Gambar ini biasanya merupakan peta lokasi, denah jaringan, atau *layout* teknis lainnya yang relevan dengan area studi. Setelah gambar dimuat, sistem akan menampilkannya sebagai dasar dalam jendela pemodelan, sehingga seluruh elemen jaringan dapat disusun secara presisi dan sesuai dengan skala. Penambahan *backdrop* ini sangat membantu dalam proses verifikasi posisi serta interpretasi topologi jaringan secara visual, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi pemodelan hidraulik.

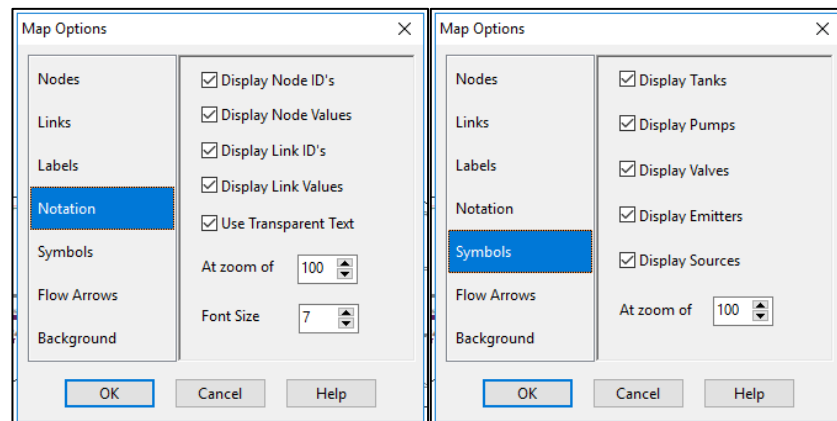


Gambar 2.13. Masukan Gambar Peta.

5. Dalam proses pemodelan jaringan perpipaan, visualisasi elemen-elemen pada peta menjadi aspek penting yang dapat menunjang pemahaman struktur dan alur distribusi sistem. Salah satu tahap yang perlu dilakukan adalah pengaturan tampilan peta agar informasi yang relevan dapat ditampilkan secara jelas. Untuk itu, pengguna dapat memilih elemen apa saja yang ingin ditambahkan

pada peta, seperti *label ID* dan simbol untuk setiap komponen jaringan. Pengaturan ini dilakukan melalui menu **View** → **Option** yang akan membuka *dialog Map Option*. Pada dialog tersebut, pertama-tama arahkan ke tab **Notation**, lalu periksa dan aktifkan opsi-opsi yang ingin ditampilkan, seperti label identifikasi dan anotasi lainnya. Setelah itu, pindah ke tab **Symbol**, dan centang seluruh kotak pilihan untuk menampilkan semua simbol grafis yang tersedia. Setelah semua pengaturan selesai, klik tombol **OK** untuk menyimpan dan menerapkannya. Perlu diketahui bahwa *dialog Map Option* ini juga menyediakan opsi tambahan untuk menampilkan berbagai elemen lain, termasuk *node*, *link*, *label*, *notation*, *symbol*, *flow direction arms*, hingga *background* peta. Seluruh elemen tersebut dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan dan tujuan spesifik dari pemodelan, guna memastikan bahwa tampilan jaringan mendukung analisis visual secara efektif dan informatif.

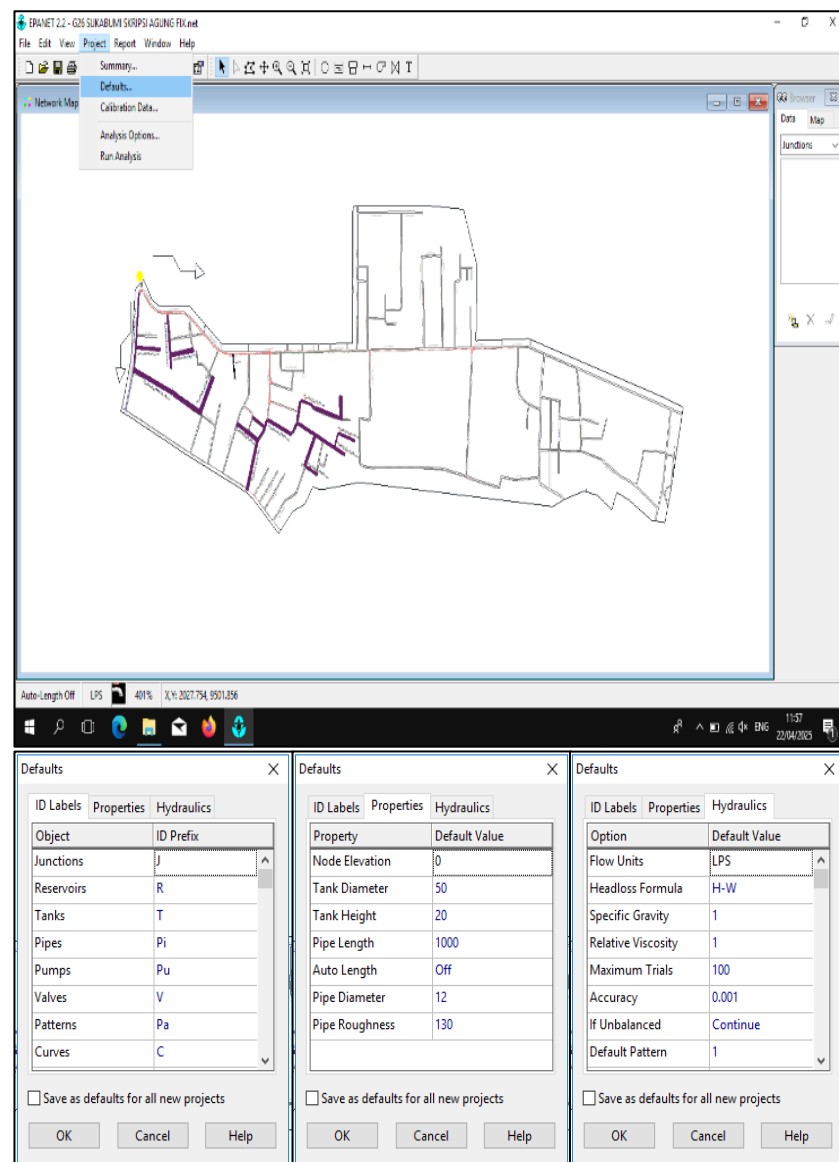




Gambar 2.14. Memilih Tampilan.

6. Sebelum memulai proses perancangan jaringan sistem perpipaan dalam suatu model hidraulik, langkah awal yang harus dilakukan adalah penyesuaian satuan serta penentuan metode perhitungan kehilangan energi atau *headloss*. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh data input yang digunakan memiliki konsistensi satuan dan kesesuaian dengan standar teknis yang diterapkan dalam penelitian. Proses konfigurasi ini dilakukan melalui menu *Toolbar Browser*, dengan urutan navigasi: **Windows** → **Browser** → **Data** → **Options** → **Hydraulics**. Setelah masuk ke bagian **Hydraulics**, pengguna perlu mengklik dua kali pada submenu tersebut untuk mengakses pengaturan lebih lanjut. Beberapa parameter penting yang harus diatur antara lain adalah satuan aliran air yang digunakan, yaitu **LPS (Liter per detik)** sebagai standar satuan debit, serta metode perhitungan kehilangan energi yang dipilih, yaitu menggunakan rumus **Hazen-Williams (H-W)**. Selain itu, opsi **Status Report** juga harus diaktifkan dengan memilih **Yes**, agar laporan hasil simulasi nantinya dapat menampilkan informasi rinci mengenai status tiap elemen jaringan. Pengaturan awal ini menjadi fondasi penting dalam membangun model yang akurat dan representatif, karena setiap kesalahan dalam tahap ini dapat berdampak signifikan terhadap

validitas hasil simulasi secara keseluruhan.



Gambar 2.15. Menyamakan Ukuran Satuan.

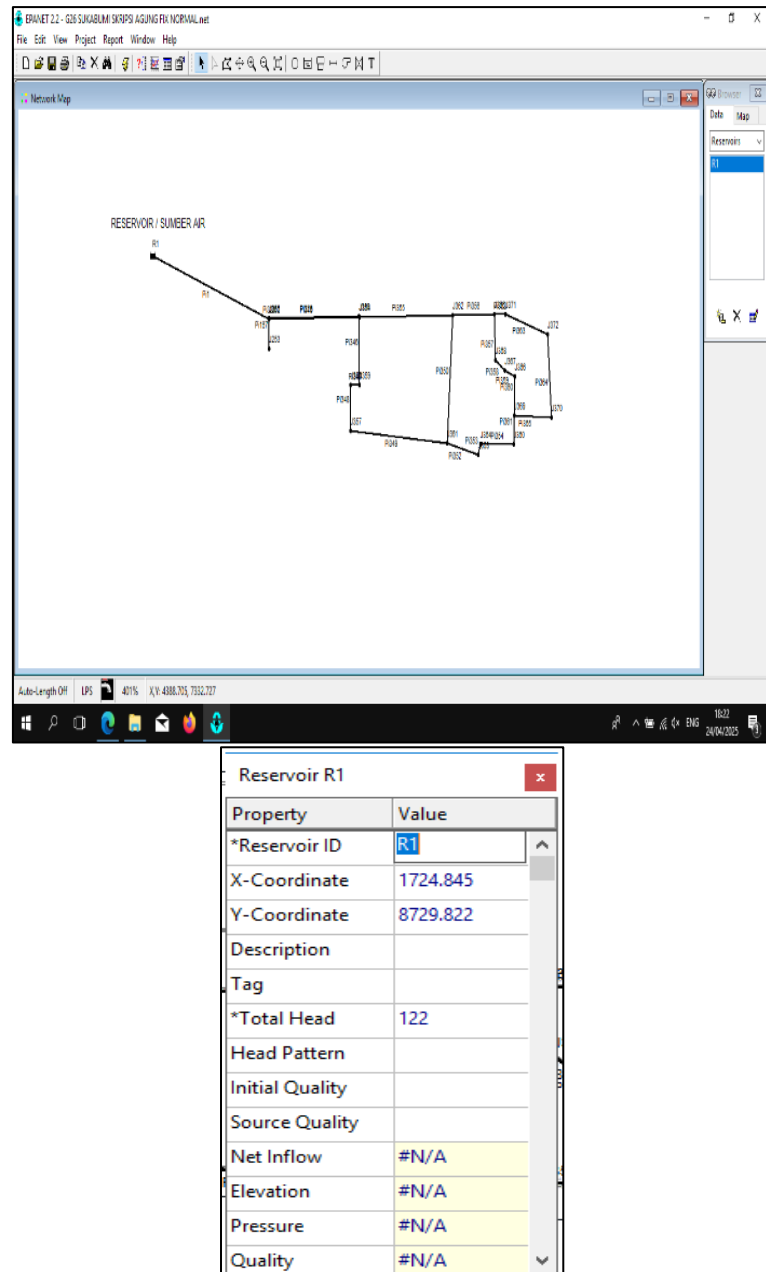
7. Setelah tahap awal konfigurasi selesai dilakukan dan seluruh pengaturan telah disesuaikan dengan kebutuhan spesifik proyek penelitian, maka langkah berikutnya adalah memasuki fase eksekusi program atau pelaksanaan simulasi. Namun, sebelum menjalankan simulasi secara menyeluruh, penting untuk mengenali dan memahami sejumlah *tools* atau perangkat bantu

yang digunakan dalam penelitian ini. Alat-alat bantu tersebut berfungsi untuk mendukung proses pemodelan, visualisasi jaringan, serta analisis data secara lebih sistematis dan akurat. Pemilihan *tools* didasarkan pada relevansinya terhadap tujuan studi serta kemampuannya dalam menyediakan fitur teknis yang diperlukan, seperti pengolahan data spasial, perhitungan hidraulik, dan pelaporan hasil simulasi. Setiap *tools* memiliki fungsi yang spesifik dan saling melengkapi dalam membentuk ekosistem kerja yang efisien, mulai dari desain jaringan hingga evaluasi performa sistem. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik dan peran masing-masing *tools* menjadi bagian penting dari metodologi penelitian ini, agar seluruh tahapan pemodelan dapat berjalan secara terstruktur dan menghasilkan keluaran yang valid serta dapat diandalkan.

a. *Reservoir*

Reservoir merupakan salah satu jenis *node* dalam jaringan perpipaan yang merepresentasikan sumber air eksternal dengan kapasitas pasokan yang dianggap tak terbatas dan kontinu. Dalam konteks simulasi menggunakan perangkat lunak seperti *Epanet*, *reservoir* digunakan untuk mensimulasikan titik awal distribusi air, seperti bendungan, mata air, atau instalasi pengolahan air bersih (IPA) yang menyuplai air ke jaringan. Ciri utama dari *reservoir* adalah bahwa tekanan atau energi yang tersedia padanya ditentukan oleh parameter *total head*, yang mencakup elevasi permukaan air ditambah tekanan dinamis (jika ada). *Total head* ini menjadi *input* utama dalam konfigurasi *reservoir*, karena secara langsung memengaruhi perhitungan tekanan dan arah aliran air ke *node-node* lainnya dalam sistem. Sebagai komponen statis, *reservoir* tidak mengalami perubahan volume selama simulasi berlangsung, sehingga berfungsi sebagai acuan hidraulik yang stabil. Oleh karena

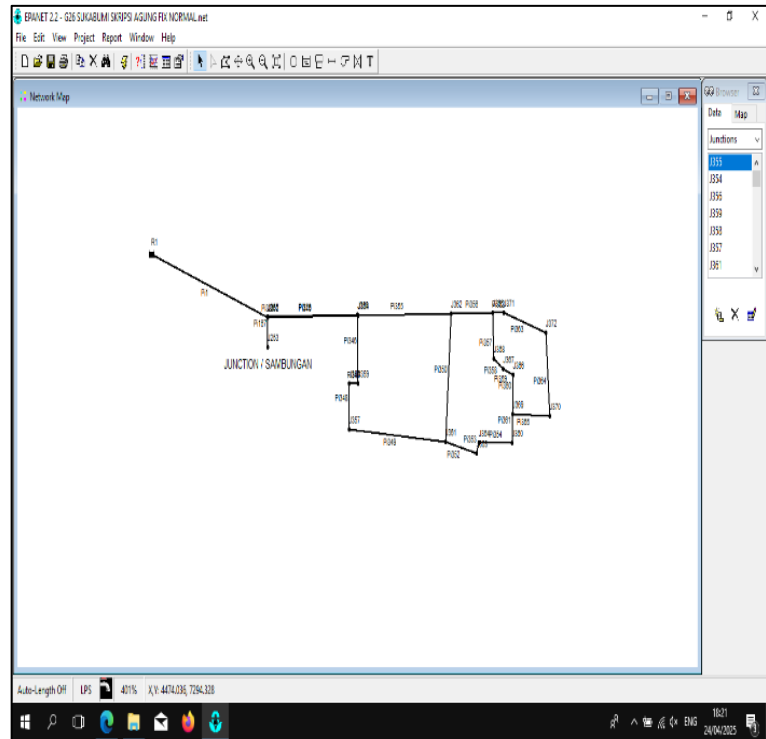
itu, penetapan nilai *total head* harus didasarkan pada data topografi dan kondisi operasional aktual, agar simulasi distribusi air dapat mencerminkan kinerja sistem secara realistis dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan teknis.



Gambar 2.16. *Reservoir*.

b. Sambungan/*Junction*

Sambungan, atau yang dalam terminologi teknis disebut sebagai *junction*, merupakan titik pertemuan dalam jaringan perpipaan di mana dua atau lebih segmen pipa saling terhubung. Titik ini memainkan peran penting dalam distribusi aliran air karena menjadi tempat pembagian atau penggabungan debit antar jalur pipa. Dalam simulasi hidraulik menggunakan perangkat lunak seperti *Epanet*, setiap *junction* memerlukan input data utama berupa elevasi yang mencerminkan ketinggian relatif terhadap datum tertentu-serta kebutuhan air dasar atau *base demand*, yaitu volume air yang diperlukan secara konstan pada titik tersebut. Data elevasi berpengaruh langsung terhadap perhitungan tekanan hidraulik, sedangkan nilai kebutuhan air menggambarkan beban distribusi yang harus dipenuhi oleh sistem pada masing-masing *node*. Ketepatan dalam mendefinisikan kedua parameter ini sangat krusial karena berdampak langsung pada akurasi hasil simulasi, termasuk distribusi tekanan, debit, dan arah aliran. Oleh sebab itu, penentuan *input* pada *junction* harus didasarkan pada data lapangan yang akurat serta perencanaan kebutuhan air yang realistis dan sesuai dengan kondisi eksisting maupun proyeksi pertumbuhan permintaan di masa depan.



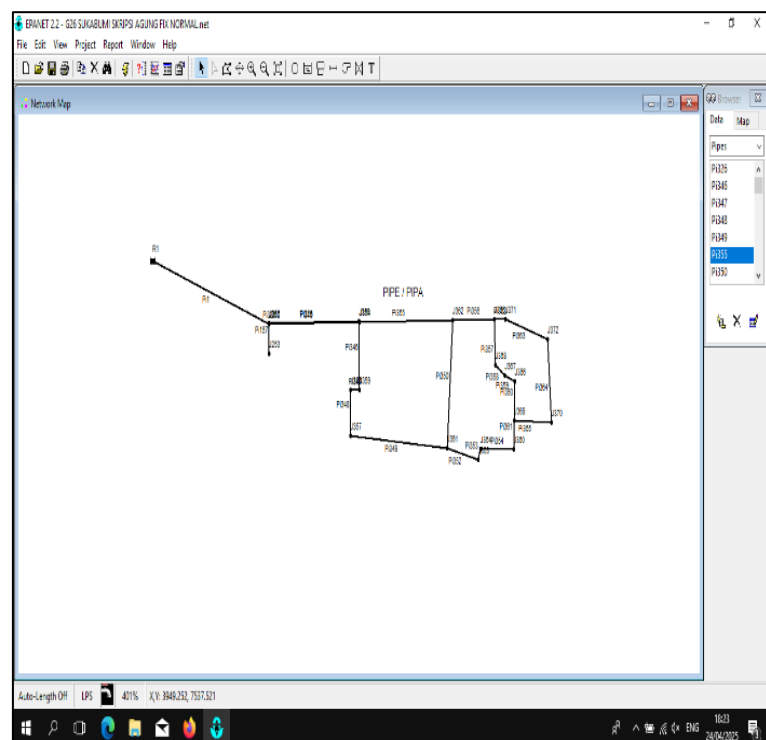
Junction J356	
Property	Value
*Junction ID	J356
X-Coordinate	3312.777
Y-Coordinate	8459.553
Description	
Tag	
*Elevation	100
Base Demand	0.652
Demand Pattern	
Demand Category	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	#N/A

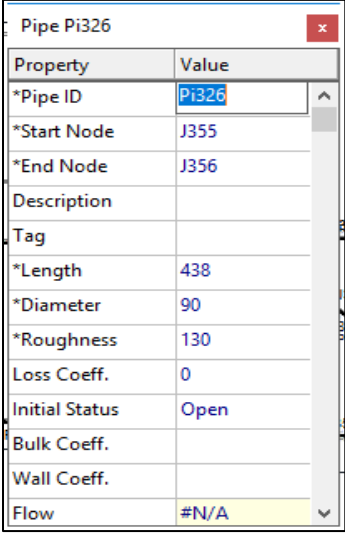
Gambar 2.17. Junction.

c. *Pipa/Pipe*

Pipa merupakan elemen utama dalam sistem jaringan distribusi air yang berfungsi sebagai media penghantar air dari satu titik ke titik lainnya. Dalam konteks simulasi menggunakan perangkat lunak *Epanet 2.2*, seluruh pipa diasumsikan selalu berada dalam kondisi penuh terisi air

sepanjang waktu operasi. Asumsi ini penting karena perangkat lunak tersebut dirancang untuk memodelkan sistem aliran bertekanan (*pressurized flow*), bukan aliran gravitasi atau aliran sebagian penuh seperti pada saluran terbuka. Selain itu, arah aliran air dalam sistem ditentukan oleh perbedaan tekanan hidraulik; air secara alami akan mengalir dari titik dengan tekanan lebih tinggi menuju titik dengan tekanan yang lebih rendah. Prinsip ini sejalan dengan hukum dasar hidraulika dan menjadi dasar dalam perhitungan distribusi tekanan, debit, dan kecepatan dalam setiap segmen pipa yang dimodelkan. Pemahaman terhadap konsep ini sangat penting dalam proses desain dan analisis jaringan perpipaan, karena berkaitan langsung dengan efisiensi distribusi, potensi kehilangan energi, serta kestabilan sistem secara keseluruhan.





Property	Value
*Pipe ID	Pi326
*Start Node	J355
*End Node	J356
Description	
Tag	
*Length	438
*Diameter	90
*Roughness	130
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A

Gambar 2.18. *Pipe*.

Pada umumnya, proses perancangan sistem perpipaan dilakukan menggunakan pendekatan *trial and error*, di mana beberapa skenario desain diuji secara berulang hingga diperoleh konfigurasi yang dianggap optimal. Namun, dalam penelitian ini diterapkan pendekatan yang lebih sistematis dengan memanfaatkan rumus korelasi antara debit aliran dan kecepatan aliran dalam pipa. Kecepatan aliran yang dijadikan acuan berkisar antara 0,6 hingga 0,7 m/s, nilai yang secara umum dianggap ideal dalam perencanaan jaringan distribusi air karena mampu meminimalkan kehilangan energi dan mencegah terjadinya sedimentasi. Berdasarkan parameter kecepatan tersebut, diameter pipa rencana dihitung menggunakan persamaan hidraulik tertentu yang menghubungkan debit (Q), kecepatan (v), dan luas penampang aliran. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan yang lebih efisien dan terukur, serta mengurangi ketergantungan pada uji coba berulang. Selain itu, metode ini juga mendukung pencapaian efisiensi hidraulik dan ekonomis dalam sistem jaringan distribusi

yang dirancang. Adapun bentuk persamaan yang digunakan dalam menentukan diameter pipa akan disesuaikan dengan kondisi teknis dan standar perencanaan yang berlaku.

$$D = \frac{4 \times \left(\frac{\text{Debit Aliran}}{1000} \right)}{\sqrt{3,14 \times v}} \times 1000 \quad (2.56)$$

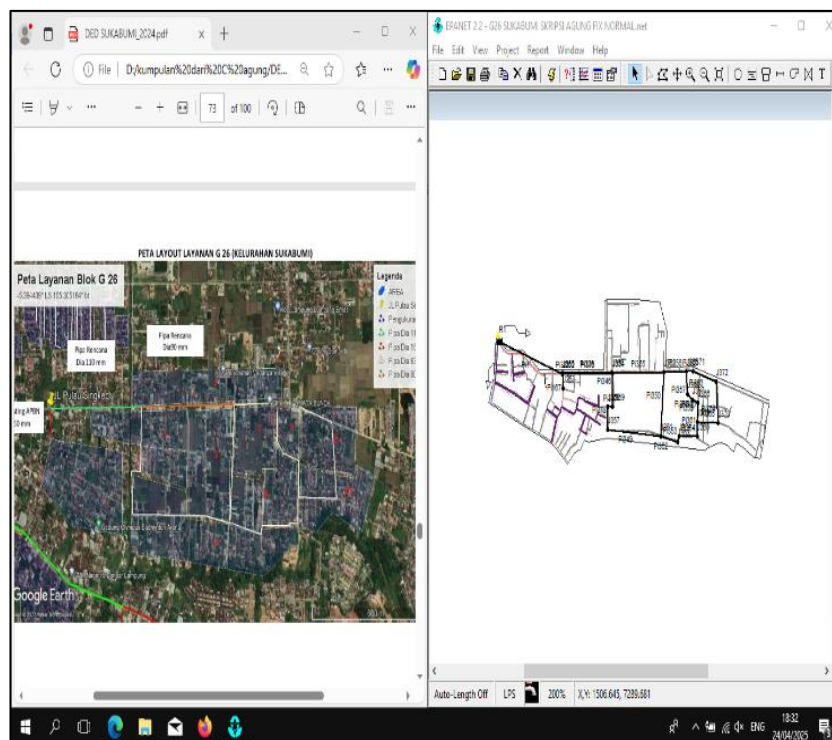
Keterangan:

D = Diameter (mm)

Aliran = Debit aliran/*flow* dari *Epanet* (LPS)

v = Kecepatan aliran rencana (m/s).

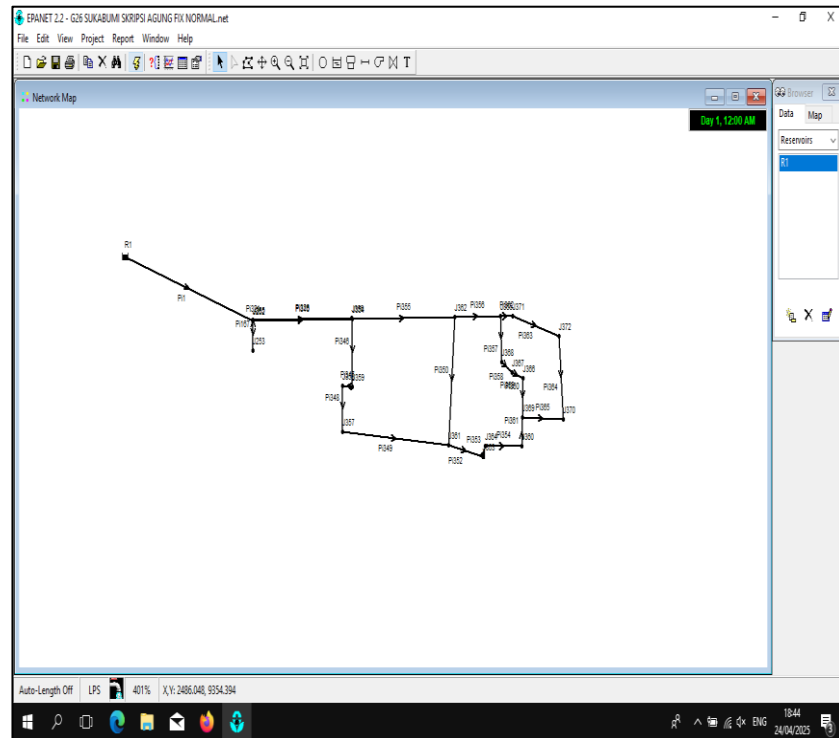
8. Dalam rangka menjalankan simulasi aliran air pada sistem perpipaan, salah satu komponen fundamental yang dibutuhkan adalah peta jaringan perpipaan yang merepresentasikan kondisi nyata di lokasi penelitian. Peta ini berfungsi sebagai dasar spasial dalam membangun model hidraulik, karena mencerminkan tata letak geometris dari setiap segmen pipa, titik sambungan (*node*), serta elemen-elemen penting lainnya seperti pompa, katup, atau *reservoir*. Keberadaan peta jaringan tidak hanya membantu dalam memvisualisasikan alur distribusi air, tetapi juga memungkinkan perangkat lunak simulasi untuk menghitung parameter teknis secara lebih akurat, seperti panjang jalur, elevasi, serta hubungan antar elemen jaringan. Dengan demikian, kualitas dan kelengkapan peta sangat memengaruhi validitas hasil simulasi yang akan diperoleh. Selain itu, peta ini juga menjadi alat bantu utama dalam proses analisis skenario, perbandingan desain, serta identifikasi potensi masalah dalam sistem distribusi air. Oleh karena itu, sebelum melakukan simulasi, perlu dipastikan bahwa peta jaringan yang digunakan telah sesuai dengan kondisi aktual di lapangan, baik dari segi skala, orientasi, maupun data atribut teknisnya.



Gambar 2.19. Simulasi.

9. Setelah tahap pemodelan sistem perpipaan selesai dilakukan berdasarkan kondisi aktual dari jalur jaringan pipa yang dirancang, langkah selanjutnya adalah menguji kelayakan dan validitas model tersebut melalui proses simulasi. Hal ini dapat dilakukan dengan memilih opsi **RUN** pada perangkat lunak yang digunakan. Fungsi dari langkah ini adalah untuk menjalankan seluruh konfigurasi model yang telah dimasukkan, sehingga sistem dapat memproses parameter-parameter yang tersedia dan menghasilkan *output* yang merepresentasikan kondisi operasional jaringan perpipaan. Proses ini juga memungkinkan pengguna untuk mengetahui apakah model yang dibangun dapat berjalan dengan baik atau masih mengandung kesalahan input, struktur, atau parameter teknis lainnya. Apabila simulasi berhasil dijalankan tanpa kesalahan, maka akan muncul pemberitahuan bahwa proses berjalan sukses, yang menandakan bahwa sistem telah memenuhi syarat teknis untuk dianalisis lebih lanjut. Sebaliknya, jika proses simulasi gagal, maka perlu dilakukan

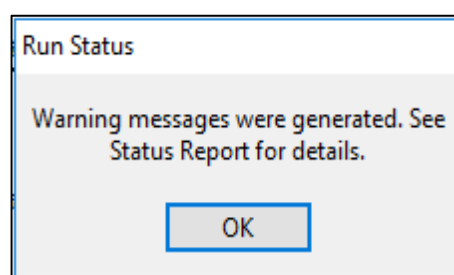
evaluasi ulang terhadap seluruh aspek model. Oleh karena itu, opsi **RUN** berperan penting sebagai titik awal dalam proses verifikasi dan validasi pemodelan hidraulik.



Gambar 2.20. *Run*.

10. Apabila selama proses pemodelan muncul notifikasi atau pemberitahuan tertentu dari perangkat lunak, hal tersebut merupakan indikasi bahwa telah terjadi kesalahan atau ketidaksesuaian dalam konfigurasi model. Pemberitahuan ini biasanya secara otomatis ditampilkan oleh sistem sebagai respons terhadap input data atau struktur jaringan yang tidak valid, tidak konsisten, atau melampaui batas yang dapat diterima oleh perangkat lunak simulasi. Dalam kondisi demikian, langkah yang perlu segera dilakukan adalah memilih tombol **OK** untuk membuka dan meninjau informasi detail dari pesan kesalahan tersebut. Informasi ini umumnya mencakup deskripsi teknis mengenai jenis kesalahan, lokasi kesalahan dalam jaringan, serta

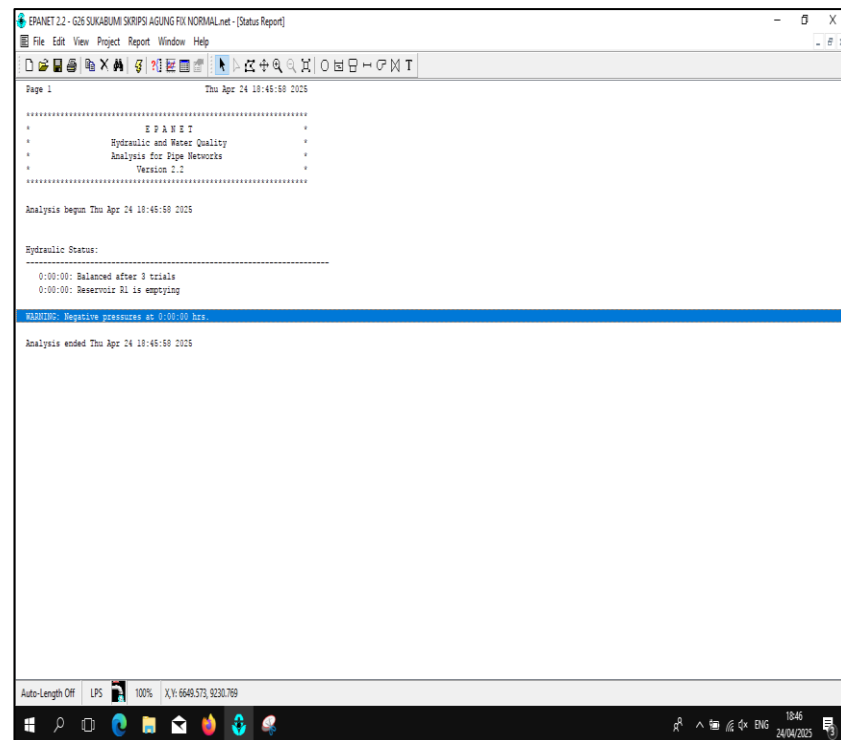
saran perbaikan atau koreksi yang perlu dilakukan. Analisis terhadap pesan kesalahan ini sangat penting agar pengguna dapat segera mengidentifikasi akar permasalahan dan melakukan penyesuaian yang diperlukan, baik dalam aspek data *input*, parameter hidraulik, maupun struktur jaringan perpipaan. Dengan memahami konteks kesalahan secara mendalam, proses pemodelan dapat dikoreksi secara efektif, sehingga meningkatkan validitas dan akurasi hasil simulasi yang dihasilkan.



Gambar 2.21. *Error.*

11. Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap laporan status hasil simulasi, ditemukan adanya ***tekanan negatif (negative pressures)*** pada beberapa bagian jaringan perpipaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa telah terjadi ketidaksesuaian atau kesalahan, baik dalam tahap *input* data maupun dalam pemilihan *tools* atau konfigurasi parameter yang digunakan dalam proses pemodelan. Tekanan negatif dalam sistem perpipaan biasanya menandakan adanya permasalahan signifikan, seperti ketidakseimbangan antara elevasi, tekanan operasional, dan laju aliran, yang dapat berdampak pada kegagalan sistem distribusi. Oleh karena itu, untuk memperbaiki kondisi tersebut, diperlukan peninjauan ulang secara menyeluruh terhadap seluruh elemen aliran dalam jaringan, termasuk tata letak pipa, posisi *node*, tekanan awal, serta karakteristik hidraulik lainnya. Proses koreksi ini hendaknya dilakukan secara sistematis dan berbasis data, agar mampu

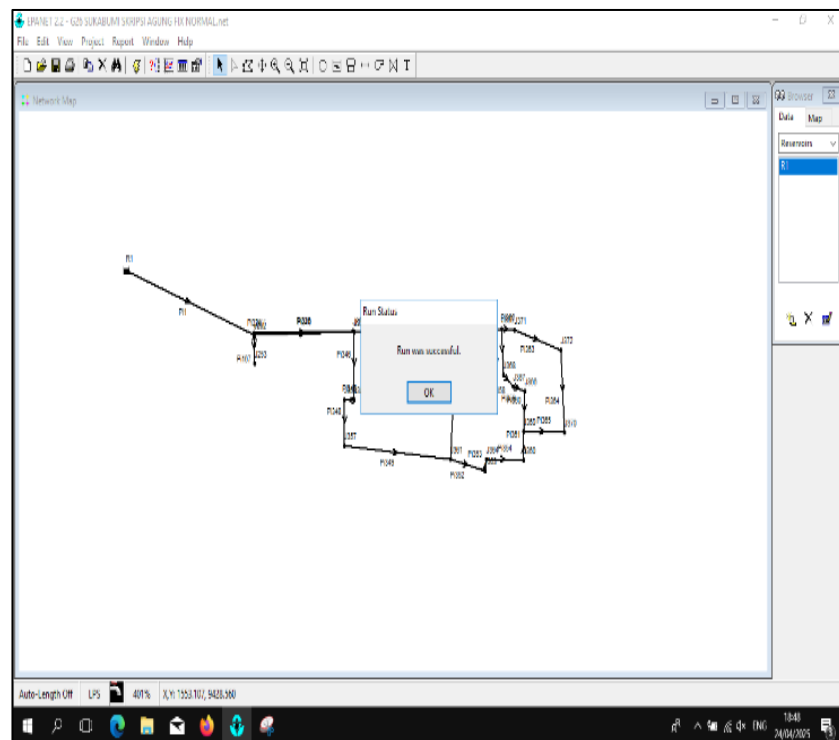
mengidentifikasi sumber kesalahan secara tepat. Dengan langkah evaluatif yang tepat, model dapat disesuaikan kembali agar mencerminkan kondisi riil sistem secara lebih akurat, sehingga hasil simulasi yang diperoleh menjadi valid dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan teknis.



Gambar 2.22. Laporan Status.

12. Setelah proses pengecekan dan koreksi data selesai dilakukan-baik terhadap input parameter, struktur jaringan, maupun elemen-elemen teknis lainnya-langkah selanjutnya adalah menjalankan kembali simulasi atau pemodelan sistem dengan memilih opsi **RUN**. Pengulangan proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa semua perbaikan yang telah diterapkan telah terakomodasi dengan benar dalam sistem. Penting untuk memperhatikan bahwa keberhasilan simulasi ditandai dengan munculnya notifikasi "**RUN WAS SUCCESSFUL**", yang menunjukkan bahwa tidak terdapat kesalahan logika maupun kekeliruan dalam konfigurasi

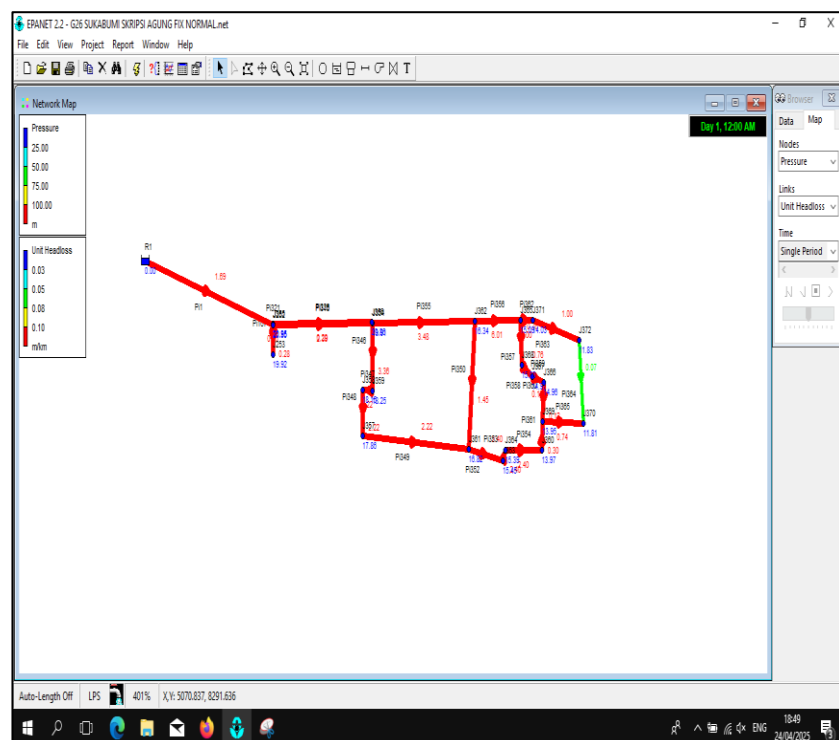
data. Tahap ini krusial dalam siklus analisis, karena menjadi titik konfirmasi bahwa sistem telah siap untuk dianalisis lebih lanjut berdasarkan hasil keluaran yang valid dan akurat. Jika simulasi belum berhasil, maka diperlukan peninjauan ulang terhadap kemungkinan kesalahan input atau pengaturan parameter yang belum sesuai. Dengan demikian, proses iteratif antara pengecekan dan pelaksanaan simulasi menjadi bagian integral dari validasi kualitas data dalam perancangan dan analisis sistem jaringan perpipaan.

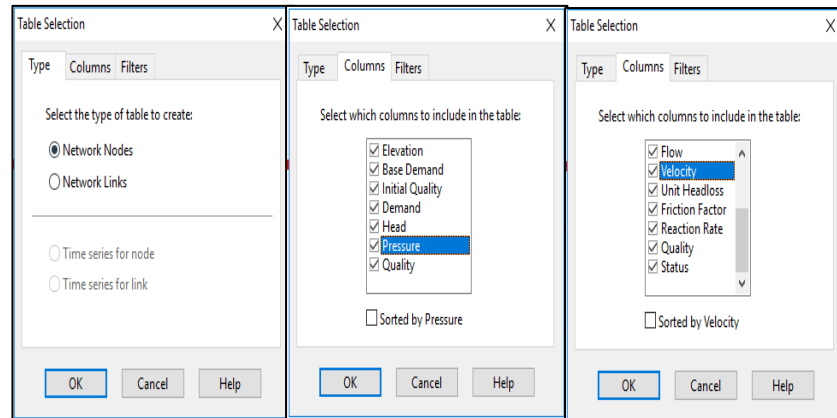


Gambar 2.23. *Run Kembali.*

13. Tahapan berikutnya dalam proses analisis adalah meninjau hasil yang dihasilkan dari pemodelan atau simulasi sistem jaringan perpipaan. Hal ini dapat dilakukan dengan memilih menu yang tersedia, yaitu opsi **Tabel** pada bagian **Type – Network Links at**, yang berfungsi untuk menampilkan rincian karakteristik dari masing-masing segmen pipa dalam jaringan. Pada bagian

Columns, pengguna disarankan untuk memilih sejumlah parameter teknis yang relevan guna mendapatkan gambaran menyeluruh terhadap performa hidraulik sistem. Parameter yang perlu dicentang antara lain *panjang pipa (Length)*, *diameter pipa (Diameter)*, *tingkat kekasaran permukaan aliran (Kekasaran Aliran)*, *kecepatan fluida (Velocity)*, *kehilangan tekanan per satuan panjang (Unit Headloss)*, *faktor gesekan (Friction Factor)*, *serta status aliran (Status)*. Pemilihan kolom-kolom ini bertujuan untuk memudahkan proses evaluasi dan interpretasi terhadap kondisi operasional sistem, sekaligus menjadi dasar dalam proses validasi desain dan pengambilan keputusan rekayasa lebih lanjut. Dengan menampilkan data dalam bentuk tabel, analisis dapat dilakukan secara lebih sistematis dan terstruktur, sehingga potensi kesalahan dalam interpretasi data dapat diminimalkan.





Gambar 2.24. Opsi Hasil Permodelan.

14. Langkah selanjutnya adalah memilih opsi "**OK**" untuk mengeksekusi perintah pada perangkat lunak yang digunakan. Setelah perintah dijalankan, penting untuk segera melakukan pemeriksaan terhadap hasil keluaran yang dihasilkan oleh sistem. Proses ini mencakup evaluasi terhadap parameter-parameter utama yang ditampilkan, baik dalam bentuk numerik maupun visual, tergantung pada jenis simulasi atau permodelan yang diterapkan. Analisis hasil ini perlu dilakukan secara cermat untuk memastikan bahwa nilai-nilai yang diperoleh berada dalam batas yang dapat diterima secara teknis dan sesuai dengan tujuan perancangan. Selain itu, interpretasi yang tepat terhadap data hasil simulasi sangat krusial guna mengidentifikasi potensi ketidaksesuaian atau anomali yang mungkin muncul selama proses pemodelan. Dengan demikian, pemeriksaan dan analisis tidak hanya berfungsi sebagai bentuk validasi, tetapi juga sebagai dasar dalam pengambilan keputusan teknis selanjutnya yang lebih akurat dan berbasis data.

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Bulk Coeff.	Wall Coeff.	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/m	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d	Quality	Status
Pipe P3326	438	90	130	0	0	0.65	0.10	0.20	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe P3346	196	63	130	0	0	1.16	0.37	3.36	0.030	0.00	0.00	Open
Pipe P3347	42	63	130	0	0	0.93	0.30	2.22	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3348	132	63	130	0	0	0.93	0.30	2.22	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3349	470	63	130	0	0	0.93	0.30	2.22	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3355	450	90	130	0	0	3.03	0.46	3.40	0.027	0.00	0.00	Open
Pipe P3350	360	63	130	0	0	0.74	0.24	1.43	0.032	0.00	0.00	Open
Pipe P3352	152	63	130	0	0	0.97	0.31	2.40	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3353	26	63	130	0	0	0.97	0.31	2.40	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3354	176	63	130	0	0	0.97	0.31	2.40	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe P3365	183	63	130	0	0	0.51	0.16	0.74	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe P3364	231	63	130	0	0	0.14	0.04	0.07	0.041	0.00	0.00	Open
Pipe P3360	110	63	130	0	0	0.20	0.06	0.12	0.039	0.00	0.00	Open
Pipe P3363	207	63	130	0	0	0.60	0.19	1.00	0.033	0.00	0.00	Open
Pipe P3362	58	63	130	0	0	0.60	0.19	1.00	0.033	0.00	0.00	Open
Pipe P3357	113	63	130	0	0	0.52	0.17	0.76	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe P3358	46	63	130	0	0	0.52	0.17	0.76	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe P3359	80	63	130	0	0	0.20	0.06	0.12	0.039	0.00	0.00	Open
Pipe P3356	208	63	130	0	0	1.59	0.51	6.01	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe P3361	78	63	130	0	0	0.32	0.10	0.30	0.036	0.00	0.00	Open
Pipe P3316	438	110	130	0	0	4.19	0.44	2.39	0.027	0.00	0.00	Open
Pipe P3321	10	90	130	0	0	0.65	0.10	0.20	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe P3167	125	130	130	0	0	3.00	0.17	0.28	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe B31	621	150	130	0	0	7.94	0.44	1.69	0.025	0.00	0.00	Open

Gambar 2.25. Hasil Permodelan.

Berdasarkan hasil pemodelan yang telah dilakukan, diperoleh sejumlah *output* simulasi yang menjadi dasar dalam pengambilan keputusan teknis. Parameter-parameter utama yang dihasilkan dari proses simulasi tersebut meliputi *pressure*, *flow*, *velocity*, *unit headloss*, faktor gesekan (*friction factor*), serta status aliran di dalam pipa. Setiap parameter ini memberikan informasi penting terkait performa hidraulik sistem perpipaan yang dianalisis. Misalnya, tekanan dan laju aliran menunjukkan efisiensi distribusi fluida, sementara kecepatan aliran dan faktor gesekan berkaitan erat dengan potensi terjadinya turbulensi atau kehilangan energi di sepanjang jaringan. Adapun status aliran menggambarkan kondisi operasional sistem, apakah berada dalam keadaan stabil, kritis, atau mengalami gangguan. Kombinasi dari semua poin *output* ini memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap kinerja sistem perpipaan, serta mendukung proses perencanaan dan optimasi desain teknis berdasarkan pendekatan berbasis data yang akurat.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian, secara umum terdapat dua pendekatan utama yang sering digunakan, yaitu metode penelitian kualitatif dan kuantitatif. Pendekatan kualitatif merupakan suatu bentuk studi yang menekankan pada pemahaman mendalam terhadap fenomena melalui informasi yang bersifat deskriptif dan diekspresikan dalam bentuk kata-kata, narasi, pemikiran, atau tulisan, sebagaimana dijelaskan oleh (Bogdan & Biklen, 1992). Sementara itu, pendekatan kuantitatif lebih berorientasi pada data numerik, di mana hasil penelitian diperoleh melalui pengukuran yang sistematis dan dirumuskan dalam bentuk angka atau pernyataan statistik yang ringkas, sebagaimana dikemukakan oleh (Creswell, 2014). Kedua metode ini memiliki karakteristik dan tujuan analisis yang berbeda, namun saling melengkapi dalam memberikan pemahaman yang menyeluruh terhadap objek kajian.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif sebagai metode utama, dengan fokus pada analisis perhitungan kebutuhan air bersih di wilayah pelayanan PDAM Way Rilau, khususnya pada *District Meter Area* (DMA) G26 yang terletak di Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk mengevaluasi tingkat kecukupan pelayanan air bersih di wilayah tersebut, serta menilai apakah sistem distribusi yang ada mampu memenuhi kebutuhan masyarakat secara optimal mulai dari tahun 2024 hingga proyeksi dua puluh tahun ke depan.

3.2. Objek dan Metodologi Penelitian

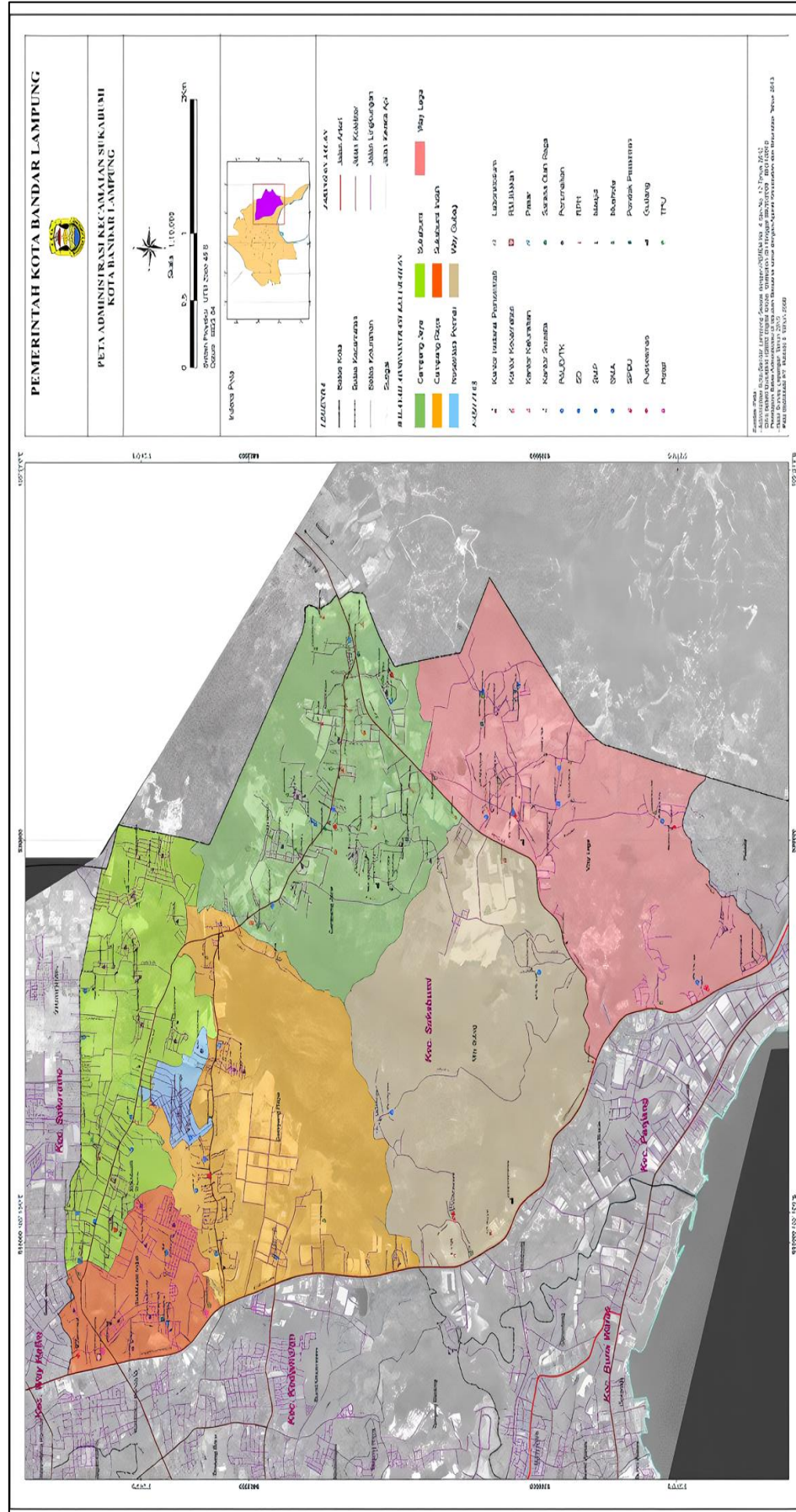
Objek yang menjadi fokus dalam penelitian ini mencakup kebutuhan air bersih serta kondisi sistem jaringan distribusi PDAM Way Rilau yang berada di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung. Dalam pelaksanaan tugas akhir, diperlukan serangkaian langkah sistematis yang dirancang secara runtut dan terstruktur, yang dikenal sebagai metodologi penelitian. Penyusunan metodologi penelitian memiliki peran penting untuk memastikan bahwa proses penelitian dapat berlangsung secara efektif, efisien, dan terarah, sehingga mampu menghasilkan temuan yang valid, memuaskan, serta memenuhi kriteria ilmiah yang telah ditetapkan.

Laporan penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem jaringan distribusi air bersih milik PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi. Analisis ini difokuskan pada upaya untuk memahami kondisi eksisting, merancang perencanaan distribusi yang efisien, serta mengelola pola konsumsi air bersih masyarakat setempat secara berkelanjutan, mulai dari tahun 2024 hingga proyeksi dua puluh tahun ke depan.

3.3. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada semester genap tahun akademik 2024/2025 bertempat di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari rangkaian hasil Kerja Praktik yang dilakukan penulis selama 3 bulan (01 Agustus - 01 November 2024) pada Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) Kota Bandar Lampung Tahun 2024. Lingkup studi kasusnya yaitu Kelurahan Sukabumi di Kecamatan Sukabumi memiliki kondisi demografi dengan

jumlah jiwa sebesar 22.606 dengan jumlah RW sebanyak 3. Sedangkan jumlah jiwa DMA G26 sebesar 2.792 dengan pembagian area sebanyak 10 area. Kelurahan Sukabumi memiliki luas wilayah seluas 3,58 Km². Kelurahan Sukabumi memiliki batas wilayah sebelah utara yaitu Kecamatan Sukarame, sebelah barat yaitu Kelurahan Sukabumi Indah dan Nusantara Permai, sebelah timur yaitu Kabupaten Lampung Selatan dan sebelah selatan yaitu Kelurahan Campang Raya dan Campang Jaya (Kecamatan Sukabumi Dalam Angka 2024, 2024). Peta administrasi dan peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan 3.2. Gambar 3.1 merupakan gambar peta administrasi untuk Kecamatan Sukabumi dimana lokasi ini merupakan wilayah yang menjadi pendekatan untuk mengetahui konsumsi rata-rata pada DMA G26. Dan untuk Gambar 3.2 merupakan lokasi pada penelitian ini.



Sumber: BPS Kecamatan Sukabumi Dalam Angka, 2024

Gambar 3.1. Peta Administrasi Kecamatan Sukabumi Kota Bandar Lampung.



Sumber: PDAM Way Rilau, 2024

Gambar 3.2. Peta Lokasi Penelitian DMA G26 Kecamatan Sukabumi.

Keterangan:

Zona I:

Kecamatan Rajabasa

Zona II:

Kecamatan Tanjung Senang

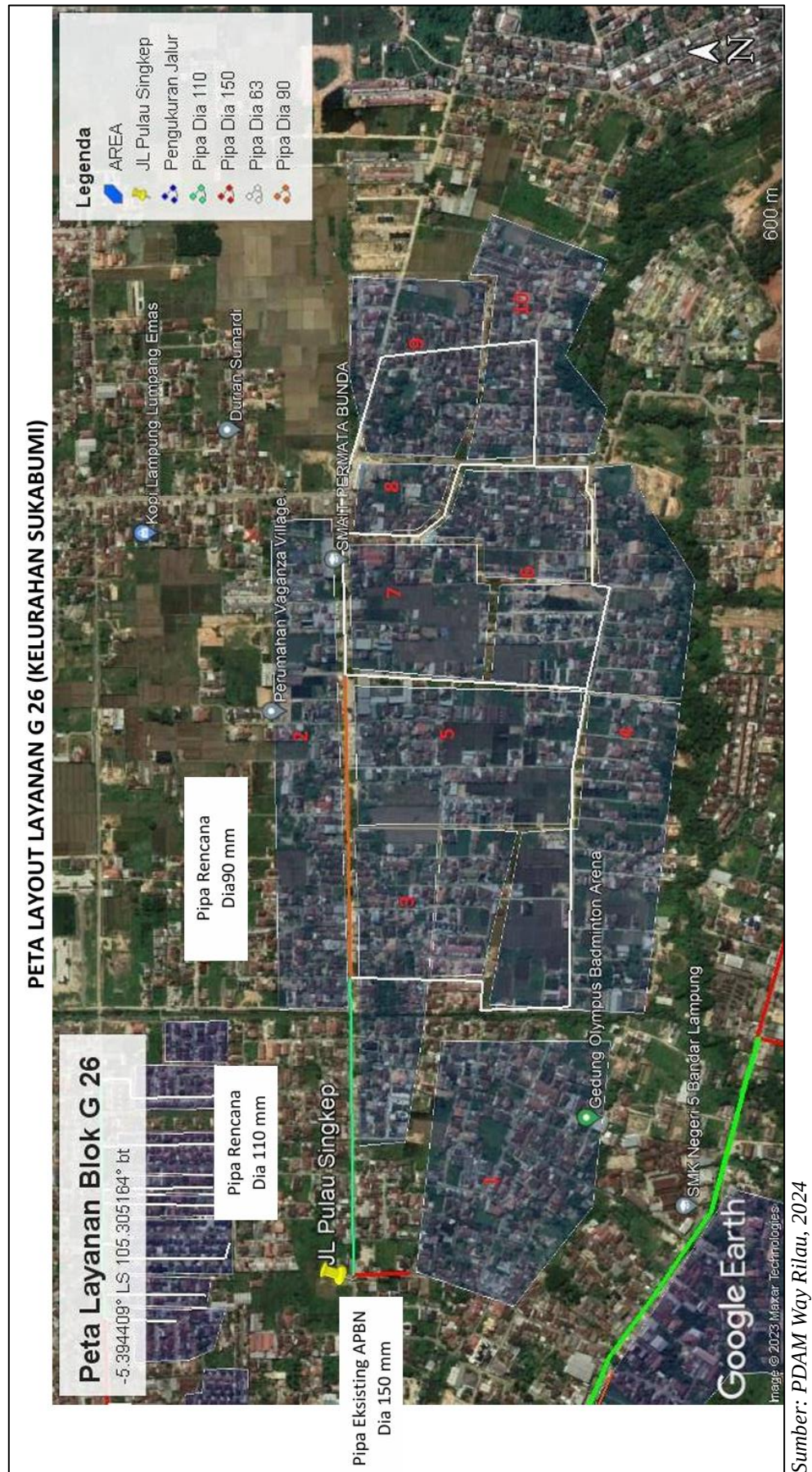
Kecamatan Sukarame

Kecamatan Sukabumi

Zona III:

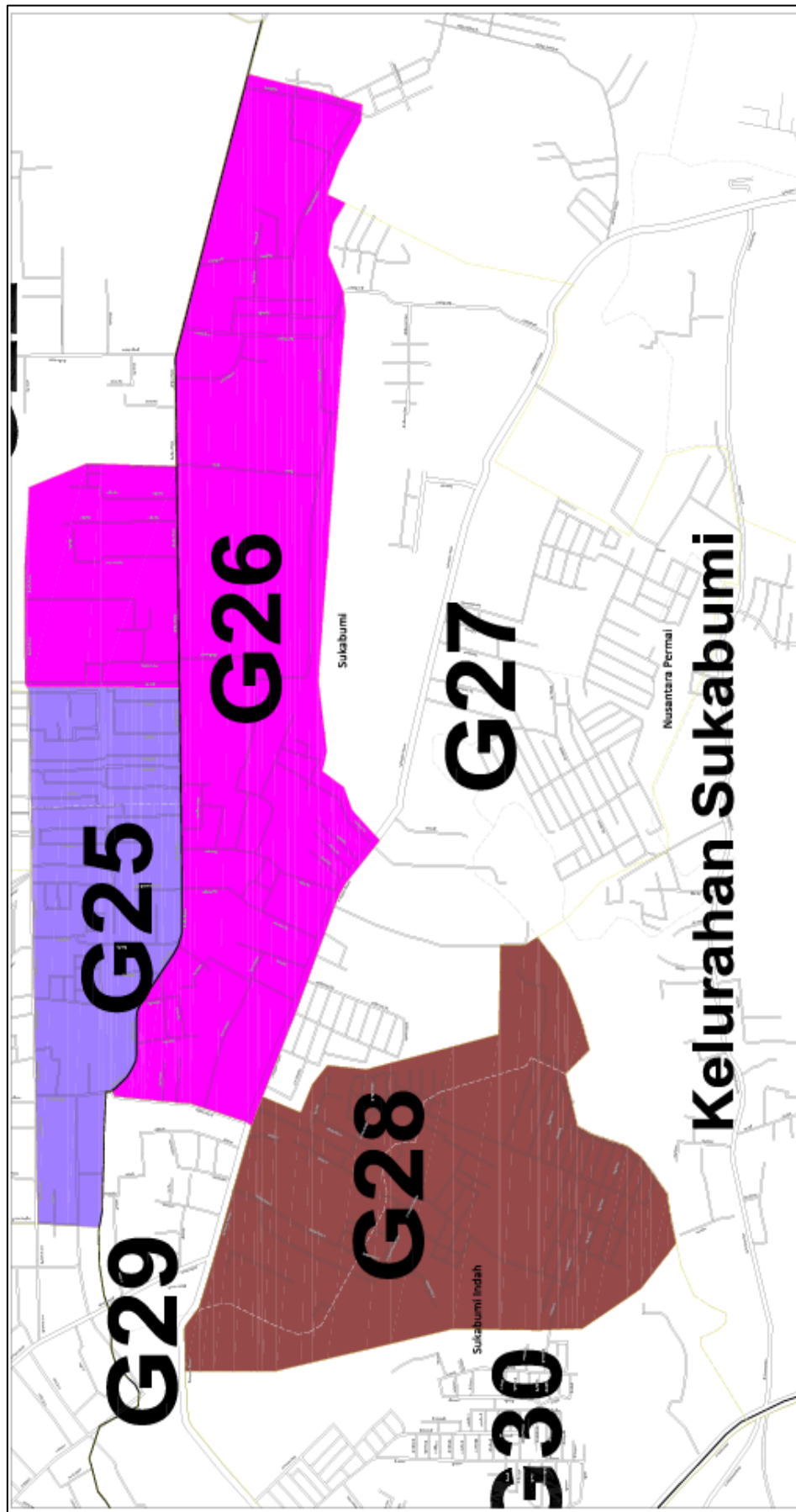
Kecamatan Way Halim

Kecamatan Kedamaian



Sumber: PDAM Way Rilau, 2024

Gambar 3.3. Peta Lokasi Layanan Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) DMA G26.



Sumber: PDAM Way Rilau, 2024

Gambar 3.5. Layout Jalur Pipa Proyek Pengembangan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) SPAM Kelurahan Sukabumi.

3.4. Studi Pustaka

Studi pustaka merupakan salah satu metode pengumpulan data yang dilakukan melalui penelaahan terhadap berbagai sumber literatur, seperti buku, jurnal ilmiah, laporan penelitian, dan dokumen relevan lainnya. Pendekatan ini digunakan sebagai upaya untuk memperkuat landasan teoritis serta mendukung data empiris yang telah diperoleh melalui observasi langsung. Melalui studi pustaka, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terkait topik yang dikaji serta memperkaya analisis yang dilakukan dalam penelitian.

3.5. Teknik Pengumpulan Data

Dalam penyusunan tugas akhir ini, proses pengumpulan data dilakukan dengan metode yang disesuaikan secara cermat terhadap jenis dan karakteristik data yang dibutuhkan secara menyeluruh. Seluruh data yang diperoleh akan dianalisis secara mendalam dengan merujuk pada literatur yang relevan guna mendukung ketepatan interpretasi dan validitas hasil penelitian. Kegiatan pengumpulan data merupakan langkah esensial yang mendasari keseluruhan proses penelitian. Adapun jenis data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Pada data primer yaitu data dari hasil survei pengamatan dan observasi langsung pada lokasi kajian. Sedangkan, pada data sekunder yaitu data yang diperoleh secara tidak langsung melalui pihak ketiga atau institusi terkait. Data sekunder ini berfungsi sebagai sumber informasi pendukung yang berasal dari dokumentasi resmi atau laporan instansi yang memiliki keterkaitan dengan objek kajian. Adapun data sekunder yang dimanfaatkan dalam penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Peta eksisting jaringan distribusi air bersih dan data dimensi pipa PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi,

Kecamatan Sukabumi.

2. Data elevasi dan titik koordinat pipa eksisting PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi.
3. Data jumlah penduduk pelanggan PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi untuk satu tahun terakhir yaitu tahun 2024 yang bersumber dari BPS, kelurahan atau instansi terkait.
4. Data sambungan rumah atau *base demand* PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi pada eksisting tahun 2024.
5. Data produktivitas/kapasitas produksi PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi.
6. Data fluktuasi penggunaan air pelanggan PDAM Way Rilau pada daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi.

3.6. Analisa Data dan Pembahasan

Pada tahap analisis data, dilakukan proses evaluasi kuantitatif terhadap data yang telah dikumpulkan guna memperoleh gambaran kebutuhan air bersih masyarakat di wilayah cakupan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi. Prosedur pengolahan data dimulai dengan tahap pengumpulan dan pengakumulasian data, dilanjutkan dengan pengelompokan berdasarkan kategori atau jenis informasi yang relevan. Setelah data terstruktur dengan baik, dilakukan analisis mendalam untuk menilai tingkat kebutuhan air bersih secara aktual maupun proyeksi ke depan. Adapun tahapan rinci dari proses analisis data tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Menghitung proyeksi jumlah penduduk pelanggan PDAM Way Rilau di daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi dengan menggunakan metode sebagai berikut.

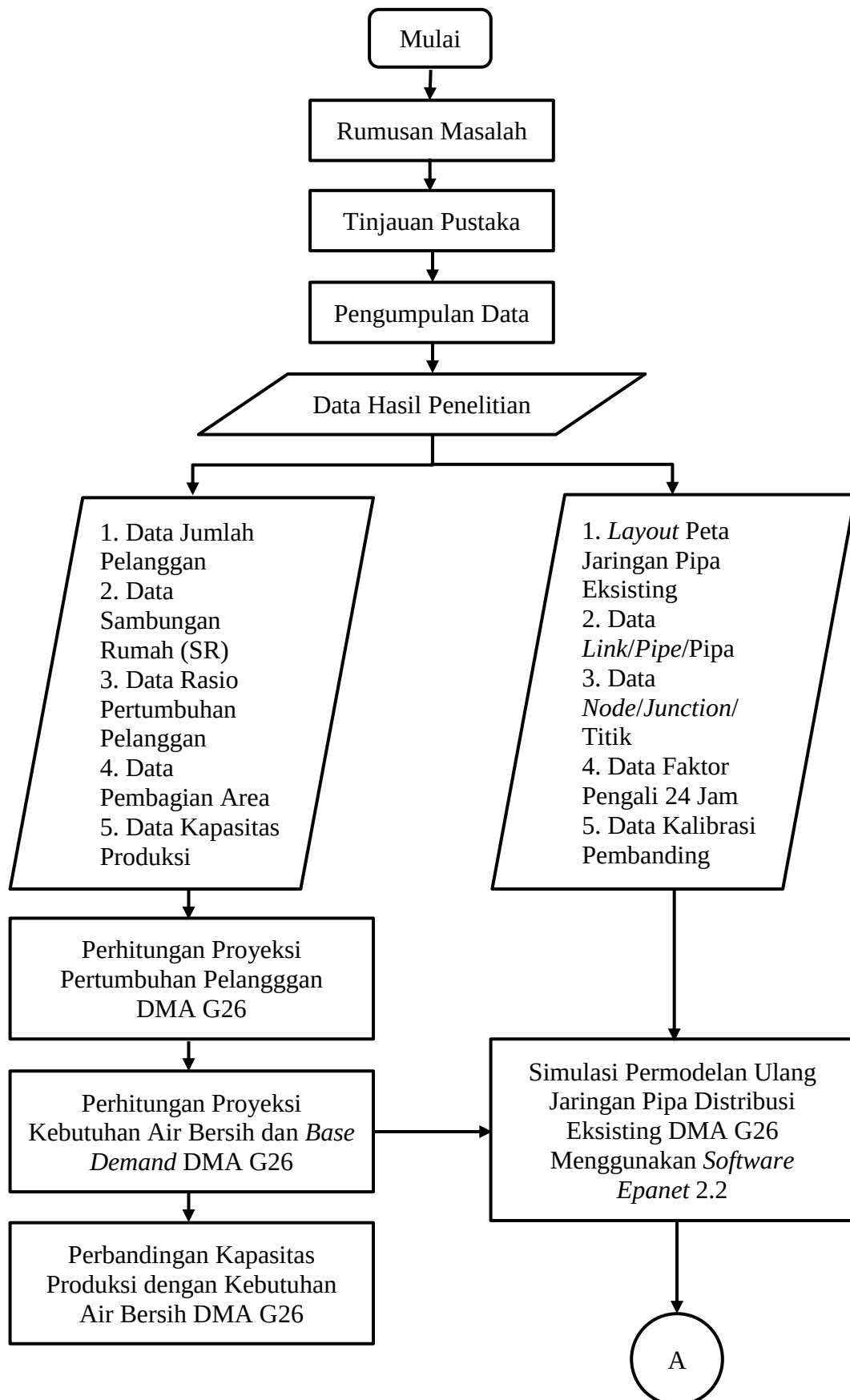
- Metode Arimatika.....persamaan (2.5)
 - Metode Geometri.....persamaan (2.6)
 - Metode Eksponensial.....persamaan (2.7)
2. Menghitung proyeksi kebutuhan air bersih masyarakat pelanggan PDAM Way Rilau Rilau di daerah pelayanan DMA G26 Kelurahan Sukabumi sampai dengan tahun perencanaan 2044.
 - Kebutuhan Air Domestikpersamaan (2.8)
 - Kebutuhan Air Non Domestikpersamaan (2.9)
 - Kebutuhan Air Totalpersamaan (2.10)
 - Kehilangan Air/Keboocoranpersamaan (2.11)
 - Kebutuhan Air Rata-Rata persamaan (2.12)
 - Kebutuhan Air Harian Maksimum.....persamaan (2.13)
 - Kebutuhan Air Jam Puncak.....persamaan (2.14)
 3. Langkah ketiga dalam penelitian ini adalah melakukan perbandingan antara kapasitas produksi air bersih yang tersedia dengan estimasi kebutuhan air bersih masyarakat pelanggan PDAM Way Rilau di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi. Analisis ini mencakup proyeksi kebutuhan hingga tahun perencanaan 2044, guna menilai tingkat kecukupan pasokan air dalam mendukung pertumbuhan jumlah pelanggan dan konsumsi air di masa mendatang.
 4. Tahapan keempat dalam penelitian ini mencakup kegiatan simulasi serta pemodelan sistem jaringan distribusi air bersih dengan menggunakan *Software Epanet* versi 2.2. Proses pemodelan dilakukan berdasarkan data kebutuhan air bersih yang telah dihitung untuk wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, dan diperkuat oleh data teknis lainnya yang relevan. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan implementasi simulasi dengan menggunakan *Epanet* 2.2 disajikan secara detail pada Subbab 2.18.2 dalam laporan ini.
 5. Langkah kelima dalam penelitian ini adalah melakukan analisis terhadap hasil simulasi jaringan distribusi air bersih yang telah dimodelkan pada tahap sebelumnya. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan *output*

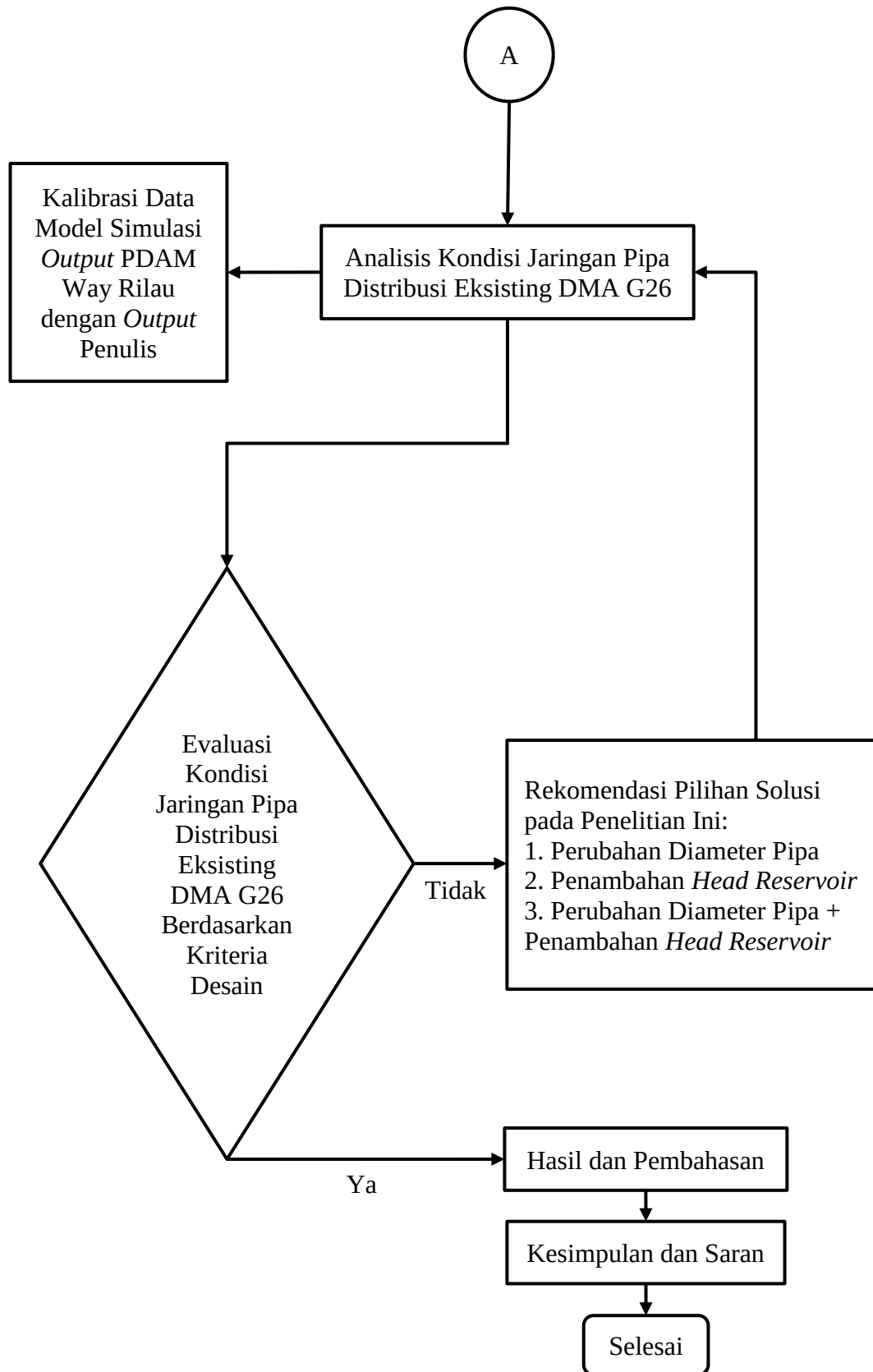
hasil simulasi (*running model*) dengan standar teknis yang tercantum dalam (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007). Tujuan dari analisis ini adalah untuk menilai sejauh mana desain jaringan distribusi air bersih yang disimulasikan telah memenuhi kriteria perencanaan dan kelayakan sistem penyediaan air minum secara nasional.

6. Langkah keenam dalam penelitian ini adalah melakukan evaluasi terhadap kinerja jaringan distribusi air bersih berdasarkan permasalahan yang teridentifikasi pada sistem perpipaan PDAM Way Rilau. Evaluasi difokuskan pada kondisi aktual di wilayah pelayanan *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi. Apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem distribusi belum berfungsi secara optimal, maka akan diusulkan alternatif solusi teknis yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan yang ada, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan efektivitas distribusi air bersih di wilayah tersebut.

3.7. Bagan Alir Penelitian

Untuk memastikan bahwa penyusunan laporan penelitian ini berlangsung secara terstruktur dan sesuai dengan perencanaan, disusun sebuah bagan alir kajian yang menggambarkan alur analisis penelitian. Bagan ini bertujuan untuk memetakan proses identifikasi permasalahan hingga tahap penentuan solusi yang tepat terhadap permasalahan tersebut. Visualisasi alur kajian tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Bagan Alir (*Flow Chart*) Penelitian.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian skripsi ini, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Proyeksi kebutuhan air bersih di wilayah pelayanan PDAM Way Rilau, khususnya pada *District Meter Area* (DMA) G26 Kelurahan Sukabumi, dirancang untuk jangka waktu 20 tahun ke depan, hingga tahun 2044. Berdasarkan data tahun 2024, kebutuhan air bersih untuk pelanggan eksisting di wilayah tersebut tercatat sebagai berikut: kebutuhan air rata-rata sebesar 5,119 liter per detik dengan suplai yang tersedia sebesar 13,24 liter per detik; kebutuhan maksimum harian mencapai 5,631 liter per detik dengan kapasitas suplai yang sama; dan kebutuhan pada jam puncak tercatat sebesar 7,678 liter per detik. Sementara itu, hasil proyeksi untuk tahun 2044 menunjukkan adanya peningkatan kebutuhan, di mana kebutuhan rata-rata air bersih diperkirakan mencapai 6,347 liter per detik, kebutuhan maksimum harian sebesar 6,982 liter per detik, dan kebutuhan pada jam puncak sebesar 9,521 liter per detik. Seluruh kebutuhan tersebut tetap berada di bawah kapasitas suplai yang konstan sebesar 13,24 liter per detik, yang menunjukkan bahwa kapasitas distribusi PDAM Way Rilau untuk wilayah DMA G26 masih mencukupi hingga tahun proyeksi.
2. Analisis neraca air untuk wilayah pelayanan PDAM Way Rilau di *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, dilakukan untuk jangka waktu 20 tahun ke depan. Pada kondisi tahun 2024, kapasitas produksi air

bersih tercatat sebesar 13,24 liter per detik atau setara dengan 1.143.936 liter per hari. Ketersediaan ini dinilai cukup untuk memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat yang mencapai 5,631 liter per detik atau 486.518 liter per hari. Dengan demikian, terdapat margin surplus air sebesar 7,609 liter per detik atau 657.418 liter per hari, menghasilkan rasio antara kapasitas dan kebutuhan sebesar 2,351, yang menunjukkan kondisi surplus yang sangat memadai. Sementara itu, berdasarkan proyeksi tahun 2044, terjadi peningkatan kebutuhan air bersih hingga mencapai 6,982 liter per detik atau 603.245 liter per hari. Meski terjadi peningkatan konsumsi, sistem distribusi PDAM Way Rilau tetap menunjukkan kondisi surplus dengan sisa kapasitas sebesar 6,258 liter per detik atau 540.691 liter per hari, dan rasio kapasitas terhadap kebutuhan menurun menjadi 1,896. Nilai rasio yang tetap lebih besar dari 1 mengindikasikan bahwa hingga tahun 2044, kapasitas produksi air bersih PDAM Way Rilau masih memadai untuk memenuhi kebutuhan pelanggan di wilayah DMA G26. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem distribusi air bersih di wilayah ini berada dalam kondisi yang aman dan dapat diandalkan dalam jangka panjang.

3. Hasil analisis simulasi terhadap kondisi eksisting jaringan distribusi air bersih di wilayah *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, menggunakan *Software Epanet* versi 2.2 menunjukkan adanya beberapa komponen yang belum memenuhi kriteria desain teknis berdasarkan (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007). Pada aspek tekanan (*pressure*), ditemukan dua *node/junction*, yakni J370 dan J372, yang memiliki nilai tekanan di bawah batas minimum yang dipersyaratkan, yaitu 5,16 hingga 82,6 meter. Pada kondisi jam puncak, tekanan di kedua *node* tersebut berkisar antara 4,09 hingga 4,13 meter, sementara pada jam normal tekanan hanya sedikit meningkat menjadi 9,06 hingga 9,08 meter. Untuk komponen *unit headloss*, terdapat satu *link* atau pipa, yakni Pi356, yang juga belum memenuhi standar desain sebesar 0 hingga 10 meter per kilometer. Nilai

unit headloss pada pipa ini tercatat sebesar 16,63 m/km pada jam puncak dan 10,23 m/km pada kondisi jam normal, yang menunjukkan terjadinya kehilangan energi yang cukup signifikan dalam sistem. Sementara itu, pada aspek kecepatan aliran (*velocity*), ditemukan 13 pipa dengan nilai kecepatan yang berada di bawah batas minimum kriteria desain, yaitu 0,3–4,5 m/s. Kecepatan aliran pada 13 pipa tersebut berada dalam rentang 0,05 hingga 0,29 m/s saat jam normal, dan meningkat sedikit pada jam puncak menjadi 0,07 hingga 0,38 m/s. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem jaringan distribusi air bersih yang ada masih memerlukan perbaikan dan penyesuaian agar dapat beroperasi sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Simulasi dilakukan dalam rentang waktu 24 jam, dimulai dari pukul 00.00 hingga kembali ke waktu yang sama. Dalam model perencanaan jaringan ini, digunakan pipa berjenis HDPE PN 10 dengan variasi diameter Ø 6", Ø 4", Ø 3", dan Ø 2", yang terbagi menjadi jaringan primer dan sekunder sebagai bagian dari struktur distribusi utama.

4. Evaluasi terhadap sistem jaringan distribusi air bersih PDAM Way Rilau pada wilayah *District Meter Area* (DMA) G26, Kelurahan Sukabumi, mengidentifikasi permasalahan utama berupa kehilangan air yang mengindikasikan tidak optimalnya aliran air mencapai pelanggan. Berdasarkan analisis teknis, penyebab dari permasalahan ini dikaitkan dengan tiga parameter hidraulik yang tidak sesuai dengan standar desain sebagaimana tercantum dalam (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2007). Ketidaksesuaian tersebut meliputi: (1) tekanan (*pressure*) yang berada di bawah ambang batas minimum sebesar 5,16 meter; (2) nilai *unit headloss* yang melampaui batas maksimum 10 meter per kilometer; dan (3) kecepatan aliran air (*velocity*) yang lebih rendah dari nilai minimum yang disyaratkan, yaitu 0,3 meter per detik. Ketiga kondisi ini menyebabkan penurunan efisiensi dalam proses distribusi dan meningkatkan potensi kehilangan air dalam sistem. Untuk mengatasi permasalahan tersebut,

dirumuskan sejumlah alternatif solusi teknis. Pertama, peningkatan tekanan dapat dicapai melalui penambahan elevasi atau *head* pada *reservoir* distribusi. Kedua, pengurangan nilai *headloss* dapat dilakukan dengan mengganti pipa eksisting menggunakan diameter yang lebih besar, sehingga menurunkan hambatan aliran. Ketiga, untuk meningkatkan kecepatan aliran pada pipa dengan debit rendah, direkomendasikan penggantian pipa ke diameter yang lebih kecil, dengan tetap memperhatikan keseimbangan sistem secara menyeluruh agar tidak menimbulkan gangguan pada bagian jaringan lainnya. Dalam implementasinya, penyesuaian desain dilakukan dengan meningkatkan *total head reservoir* menjadi 130 meter. Selain itu, dilakukan penggantian pipa dengan total panjang 2.399 meter, baik dalam bentuk pembesaran maupun pengecilan diameter pipa, dengan spesifikasi ukuran Ø 1", Ø 1¼", Ø 1½", dan Ø 2½", sesuai kebutuhan teknis pada masing-masing segmen jaringan yang dievaluasi.

5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dalam skripsi ini, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat diajukan untuk dijadikan pertimbangan dalam penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan kajian yang lebih mendalam terhadap kondisi jaringan distribusi eksisting, dengan memperluas ruang lingkup analisis pada aspek pengembangan jaringan. Selain itu, dapat pula dilakukan simulasi alternatif dengan mengganti sistem distribusi berbasis gravitasi menjadi sistem distribusi menggunakan pompa, guna mengevaluasi efisiensi hidraulik dan potensi peningkatan performa distribusi air bersih.
2. Penelitian lanjutan dapat mempertimbangkan penggunaan perangkat lunak alternatif selain *Software Epanet*, seperti *WaterCAD* atau perangkat lunak simulasi hidraulik lainnya, guna memperoleh hasil

analisis yang lebih komprehensif dan memungkinkan adanya perbandingan performa serta akurasi antar perangkat lunak dalam pemodelan sistem distribusi air bersih.

3. Penelitian berikutnya diharapkan dapat mengembangkan studi ini dengan menambahkan analisis aspek finansial, seperti penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk pembangunan atau pengembangan jaringan perpipaan. Selain itu, perlu juga dilakukan evaluasi terhadap kualitas air bersih yang disalurkan melalui sistem distribusi guna memastikan kesesuaiannya dengan standar kesehatan. Kajian lanjutan juga disarankan untuk memperdalam analisis teknis terhadap komponen jaringan, khususnya pipa-pipa yang mengalami penggantian dalam pemodelan menggunakan *Epanet 2.2*, termasuk evaluasi terhadap efektivitas dan efisiensi penggantianannya dalam sistem distribusi secara keseluruhan.
4. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengintegrasikan komponen aksesoris jaringan seperti *valve* (katup), *tank* (tangki), *damper* (peredam), dan elemen tambahan lainnya ke dalam model distribusi yang dibangun menggunakan *Software Epanet 2.2*. Penambahan komponen-komponen tersebut bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi serta mendekatkan model terhadap kondisi operasional yang lebih representatif di lapangan.
5. Dalam melakukan analisis kebutuhan air bersih serta pemodelan jaringan distribusi, disarankan agar proses dilakukan secara rinci dan mendalam guna memperoleh hasil yang mendekati kondisi aktual maupun proyeksi perencanaan. Untuk mendukung validitas data dalam pengembangan jaringan di masa mendatang, sebaiknya dilakukan survei langsung kepada masyarakat pengguna layanan dan instansi terkait, sehingga data yang digunakan dalam simulasi dapat merepresentasikan kebutuhan dan kondisi lapangan secara lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Layla, M. A. H., Shamim, A., & Middlebrooks, E. J. (1977). *Water Supply Engineering Design*. Ann Arbor Science Publishers. <https://books.google.co.id/books?id=yUHHxwEACAAJ>
- Asmadi, K., & Kasjono, H. S. (2011). *Teknologi Pengolahan Air Minum*. Yogyakarta: Gosyen Publishing, 11.
- Barikiyah, S., Utama, T. T., Nengse, S., & Setyowati, R. D. N. (2023). Evaluasi Sistem Jaringan Distribusi Air Minum PDAM Kota Mojokerto Instalasi Pengolahan Air (IPA) Wates Zona Pelayanan Pengolahan Air Prajurit Kulon. *Jurnal Reka Lingkungan*, 11(2), 152–161.
- Bogdan, R. C., & Biklen, S. K. (1992). *Bogdan, Robert C., and Sari Knopp Biklen, Qualitative Reseach for Education: An Introduction to Theory and Methods, 2nd Ed. Boston: Allyn & Bacon, 1992*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:155445741>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications. https://books.google.co.id/books?id=4uB76IC_pOQC
- Darmasetiawan, M. (2001). *Teori dan Perencanaan Instalasi Pengolahan Air*. Bandung: Yayasan Suryono.
- Dirjen Cipta Karya. (2009). *Pedoman Pengelolaan Program Pamsimas*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Ekawati, D. Y. (2007). Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih untuk Kecamatan Pracimantoro yang Dilayani PDAM Giri Tirta Sari Proyeksi Tahun 2027. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

- Ghazy Aflah, T., Hastutiningrum, S., Teknik Lingkungan, J., Sains, I., & AKPRIND Yogyakarta, T. (2022). Perencanaan Jaringan Perpipaan Kawasan Tumbuh Kembang Perumahan Desa Logandeng Kabupaten Gunung Kidul Menggunakan Aplikasi Epanet 2.0. *Serambi Engineering*, VII(1).
- Hasibuan, D. A. P. (2013). *Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air Baku di Kabupaten Tangerang*.
- Immanuel, R. (2014). Analisa Sistem Distribusi Air Bersih Di PDAM Tirta Bulian Tebing Tinggi pada Perumahan Griya Prima Menggunakan Metode Hardy Cross dengan Kajian Pembanding Analisis Epanet 2.0. *Doctoral Dissertation, Universitas Sumatera Utara*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110642352>
- Kecamatan Sukabumi Dalam Angka 2024 (2024). <https://bandarlampungkota.bps.go.id/id/publication/2024/09/26/26553ef411f6234f02a17c27/kecamatan-sukabumi-dalam-angka-2024.html>
- Kencanawati, M. (2017). Analisis Pengolahan Air Bersih pada WTP PDAM Prapatan Kota Balikpapan. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, 2(2), 103–117.
- Kodoatie, R. J., & Sjarief, R. (2017). *Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu*.
- Kota Bandar Lampung Dalam Angka 2024 (2024). <https://bandarlampungkota.bps.go.id/id/publication/2024/02/28/46948a7ffb72878250da731f/kota-bandar-lampung-dalam-angka-2024.html>
- Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya Dinas PU, Ditjen Cipta Karya: Dinas Pekerjaan Umum: Jakarta (2000).
- Laksana, A. W. (2021). Evaluasi Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih di Kecamatan Kwadungan Kabupaten Ngawi dengan Menggunakan Software Epanet 2.0. *Rekayasa Teknik Sipil*, 9(1).
- Linsley, R. K., & Franzini, J. B. (1996). Teknik Sumber Daya Air Jilid 2. *Erlangga, Jakarta*.
- Lisha, S. Y., Fitriada, W., Sawir, H., & Putra, T. P. (2022). Analisis Sistem Distribusi Air Bersih Menggunakan Epanet 2.0 di PDAM Tirta Langkisau Unit Pelayanan Lumpo. *Jurnal Sains Dan Teknologi: Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknologi Industri*, 22(2), 417–423.

- Maulidya, F., & Adelina, M. (2018). Periodesasi Perkembangan Dewasa. *Periodesasi Perkembangan Dewasa*, 1–10.
- Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=oxSmugEACAAJ>
- Meicahayanti, I., Muryono, S. M., & Setiawan, Y. (2021). Evaluasi Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih pada District Meter Area Loa Buah Kota Samarinda. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 4(2), 37–45.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Muliakusumah, S. (2000). *Proyeksi Penduduk*. Jakarta: *Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia*.
- PDAM Way Rilau. (2024). *DED Pembangunan Jaringan Distribusi dan Sambungan Rumah (SR) Usulan Dana Alokasi Khusus (DAK) Tahun 2024 Untuk Proyek KPBU SPAM Kota Bandar Lampung*.
- Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/Menkes/PER/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, Pub. L. No. 492/Menkes/PER/IV/2010 (2010). <http://hukor.kemkes.go.id/hukor/0/2010/21>
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 18 Tahun 2007 Tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, Pub. L. No. 18 (2007). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/285851/permen-pupr-no-18-tahun-2007>
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2016 Tahun 2016 Tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum, Pub. L. No. 27/PRT/M/2016 (2016). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/104463/permen-pupr-no-27prtm2016-tahun-2016>
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 16 Tahun 2005 Tentang Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, Pub. L. No. 16 (2005). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/49357/pp-no-16-tahun-2005>
- Pinandari, A. W., & Wilopo, S. A. (2018). Position and Chance of Indonesia Family Planing to Achieve RPJMN 2015-2019 and FP2020 Targets. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 14(1), 90–98.

- Priyantoro, D. (1991). *Hidraulika Saluran Tertutup*. Malang: Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Riduan, R., Firmansyah, M., & Fadhilah, S. (2017). Evaluasi Tekanan Jaringan Distribusi Zona Air Minum Prima (ZAMP) PDAM Intan Banjar Menggunakan Epanet 2.0. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(1).
- Roberson, J. A., Cassidy, J. J., & Chaudhry, M. H. (1998). *Hydraulic Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://books.google.co.id/books/about/Hydraulic_engineering.html?id=TvtRAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Rossman, L. A. (2000). Epanet 2: User's Manual: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. *US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH*, 45268.
- Sari, K. I. (2021). Evaluasi Jaringan Pipa Distribusi Air Minum dengan Menggunakan Epanet 2.0 di Kecamatan Girsang Sipangan Bolon Kabupaten Simalungun. *Buletin Utama Teknik*, 16(3), 199–206.
- SNI 6728.1:2015 Tentang Penyusunan Neraca Spasial Sumber Daya Alam-Bagian 1: Sumber Daya Air, Pub. L. No. SNI 6728.1:2015 (2015). www.bsn.go.id
- Sujarweni, V. W. (2014). *Metodologi Penelitian*. Yogyakarta: Pustaka Baru Pers, 74.
- Sumartoro, D. (2013). Perencanaan Pengembangan Penyediaan Air Bersih di Kecamatan Gangga Kabupaten Lombok Utara. *Skripsi S-1 Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram: Mataram*.
- Sutrisno, C. T., & Suciastuti, E. (2002). *Teknologi Penyediaan Air Bersih / C. Totok Sutrisno; Eni Suciastuti*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135273243>
- Talanipa, R., Putri, T. S., Rustan, F. R., & Yulianti, A. T. (2022). Implementasi Aplikasi Epanet dalam Evaluasi Pipa Jaringan Distribusi Air Bersih PDAM Kolaka. *INFORMAL: Informatics Journal*, 7(1), 46–58.
- Triatmodjo, B. (1993). *Hidraulika II* (1st ed., Vols. 2–3). Beta Offset Yogyakarta.
- Undang-Undang (UU) Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, Pub. L. No. 7, 1 (2004). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/40497/uu-no-7-tahun-2004>

- Viessman, W., & Hammer, M. J. (2005). *Water Supply and Pollution Control* (Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, Ed.; 7th ed.). Pearson Prentice Hall. https://books.google.co.id/books/about/Water_Supply_and_Pollution_Control.html?id=TQlSAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Walski, T. M., Chase, D. V., & Savic, D. A. (2001). *Water Distribution Modeling* (Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications, Ed.; 17th ed., Vol. 2). Haestad Press. https://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pub/17/
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw Hill. <https://books.google.co.id/books?id=egk8SQAACAAJ>
- Wigati, R., Maddeppungeng, A., & Krisnanto, I. (2015). Studi Analisis Kebutuhan Air Bersih Pedesaan Sistem Gravitasi Menggunakan Software Epanet 2.0. *Jurnal Konstruksia*, 6(2), 1–9. <https://doi.org/10.24853/jk.6.2.%25p>
- Yahya, A., Triyono, T., & Basuki, B. (2021). Evaluasi Jaringan Distribusi untuk Optimalisasi Pelayanan Air Bersih Wilayah Reservoir Jan PDAM Kota Ternate. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 21(2), 23–37. <https://doi.org/10.37412/jrl.v21i2.114>
- Yuliani, Y., & Rahdriawan, M. (2015). Kinerja Pelayanan Air Bersih Berbasis Masyarakat di Kelurahan Tugurejo Kota Semarang. *Jurnal Pengembangan Kota*, 3(1), 11–25. <https://doi.org/10.14710/jpk.3.1.11-25>
- Yunus A. Cengel, D., & Cimbala, J. M. (2017). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education. https://books.google.co.id/books?id=cPs_vgAACAAJ