

**DISTRIBUSI SISA KLOR DAN *E. coli*
DI DUA KAWASAN *DISTRICT METER AREA*
KOTA PADANG PANJANG**

LAPORAN PENELITIAN

*Sebagai Salah Satu Syarat untuk Menyelesaikan Program Profesi pada
Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur Sekolah Pascasarjana
Universitas Andalas*



**PUTI SRI KOMALA
2341612171**

PEMBIMBING:

Prof. Dr. Ir. Novirman Jamarun, M.Sc, IPU, ASEAN Eng.

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN PROFESI INSINYUR
SEKOLAH PASCASARJANA UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2024**

**DISTRIBUSI SISA KLOR DAN *E. Coli*
DI KAWASAN *DISTRICT METER AREA*
KOTA PADANG PANJANG**

**PUTI SRI KOMALA
2341612171**



**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN PROFESI INSINYUR
SEKOLAH PASCASARJANA UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

Judul Tugas Akhir : **DISTRIBUSI SISA KLOR DAN *E. coli* DI
DUA KAWASAN *DISTRICT METER AREA*
KOTA PADANG PANJANG**

Nama Mahasiswa : **PUTI SRI KOMALA**

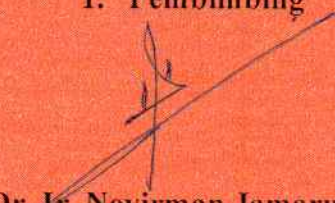
Nomor Induk Mahasiswa : **2341612171**

Program Studi : **PROGRAM PROFESI INSINYUR**


Laporan Penelitian telah diuji dan dipertahankan di depan sidang
panitia ujian Profesi Insinyur pada Sekolah Pascasarjana Universitas Andalas
dan dinyatakan lulus pada tanggal 7 Agustus 2024.

Menyetujui,

1. Pembimbing


Prof. Dr. Ir. Novirman Jamarun, M. Sc,
IPU, ASEAN Eng.
NIP. 195511061980031001

2. Koordinator Program Studi


Ir. Benny Dwika Leonanda, MT, IPM,
ASEAN Eng
NIP. 196608061994121000

3. Direktur Sekolah Pascasarjana
Universitas Andalas

Prof. apt. Henny Lucida, Ph. D
NIP. 196701151991032002

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa distribusi kadar sisa klor dan *E.coli* di district meter area (DMA) Jaringan Distribusi Padang Panjang. Sisa klor dan tekanan dari pengukuran lapangan dan simulasi dibandingkan. Korelasi antara sisa klor terhadap *E. coli*, jarak, temperatur, pH dan tekanan juga dievaluasi. Penelitian dilakukan di dua DMA Jaringan Distribusi Padang Panjang. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak EPANET. Dari hasil pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa kadar klorin residu berkisar antara 0,26 mg/L hingga 0,61 mg/L, sedangkan dengan simulasi berkisar antara 0,10-0,61 mg/L. Perbandingan nilai sisa klor dan tekanan dari hasil pengukuran lapangan dan simulasi memiliki nilai RMSE masing masing 0,12 dan 0,69 pada DMA 1 dan 0,12 dan 0,47 pada DMA 2. Namun, berdasarkan hasil simulasi, dosis klorin yang diberikan pada sumber masih belum mencukupi untuk mendapatkan nilai minimum 0,2 mg/L pada lokasi terjauh. Uji Pearson menunjukkan bahwa sisa klorin berkorelasi sangat kuat terhadap jarak, berkorelasi kuat terhadap pH, suhu dan tekanan, serta tidak berkorelasi terhadap *E. coli*.

Kata Kunci : District Meter Area (DMA), *E. coli*, Jaringan Distribusi, Simulasi, Sisa klor.



KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillahill'abidin, segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Penelitian dengan judul **Distribusi Sisa Klor dan *E. Coli* di Dua Kawasan *District Meter Area* Kota Padang Panjang**. Shalawat serta salam juga penulis sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Laporan Teknik ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Pendidikan Profesi Insinyur Program Pascasarjana Universitas Andalas. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa begitu banyak pihak yang telah turut membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian Laporan Teknik ini. Dalam kesempatan ini, dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat perkenankanlah Penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Suami tercinta Prof. Mulyadi Bur yang selalu memberikan semangat, motivasi serta doa-doa yang tulus demi keberhasilan Penulis;
2. Prof. Dr. Ir. Novirman Jamarun, M. Sc, IPU, ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan tenaga dalam memberikan ilmu, saran, bimbingan dan dukungan yang sangat berharga bagi penulis dalam menyelesaikan Laporan Penelitian ini;
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Rika Ampuh Hadiguna, S.T., M.T., IPU., Asean Eng, Ibu Prof. Ir. Vera Surtia Bachtiar, ST., MSc, PhD., IPU, Dr. Ir. Is Prima Nanda, MT, IPU selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan berharga bagi Penulis;
4. Bapak Ir. Benny Dwika Leonanda, MT, IPM, ASEAN Eng selaku Ketua Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur Fakultas Pasca Sarjana Universitas Andalas;
5. Bapak dan Ibu dosen beserta karyawan-karyawati Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur

Akhir kata Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Penulis menerima segala bentuk kritik dan saran demi kesempurnaan laporan ini dan

perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Allah SWT membalas kebaikan dengan yang lebih baik, Amin ya Robbal Alamin.

Padang, Agustus 2024

Puti Sri Komala



DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Air Minum	5
2.1.1 Kualitas Air Minum	5
2.1.2 Kuantitas Air Minum	5
2.1.4 Persyaratan Tekanan Air Minum	6
2.2 Sistem Penyediaan Air Minum	6
2.3 Jaringan Distribusi Air Minum	8
2.3.1 Sistem Pengaliran Air.....	8
2.3.2 Reservoir Distribusi.....	9
2.3.3 Perpipaan Distribusi	9
2.3.4 Hidrolika Perpipaan Distribusi.....	12
2.4 Disinfeksi.....	14
2.5 Chlorine	15
2.5.1 Jenis Klor	15
2.5.2 Klorinasi	17
2.5.3 Kinetika Peluruhan dan Kinetika Penyisihan Mikroorganisme	21
2.6 Bakteri Coliform	22
2.6.1 Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Bakteri Coliform.....	24
2.6.2 Dampak Bakteri <i>Eschericia coli</i>	24

2.7 Aplikasi EPANET 2.2 dalam Analisa Jaringan Distribusi.....	26
2.8 District Meter Area (DMA).....	27
2.9 PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang	28
2.9.1 Sejarah Singkat PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang	28
2.9.2 Daerah Pelayanan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.....	29
2.9.4 Sistem Pengolahan.....	37
2.9.5 Kualitas Air.....	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	39
3.1 Umum.....	39
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	39
3.3 Tahapan Penelitian	39
3.3.1 Studi Literatur	40
3.3.2 Studi Pendahuluan.....	40
3.3.3 Pengumpulan Data Sekunder	41
3.3.3.1 Jaringan Distribusi	41
3.3.3.2 Pengamatan Fluktuasi Air pada Reservoir.....	44
3.3.3.3 Data Pemakaian Pelanggan.....	44
3.3.3.4 Data Kualitas Air Reservoir Bukit Surungan	45
3.3.4 Pengambilan Sampel Air.....	45
3.3.5 Analisis Kualitas Air	45
3.3.6 Pengujian Tekanan Pipa	47
3.3.7 Pengujian Sisa Klor untuk Penentuan Koefisien <i>Bulk</i> dan Koefisien <i>Wall</i>	47
3.3.8 Analisis Data	48
3.3.8.1 Simulasi Hidrolis Jaringan Distribusi	49
3.3.8.2 Pola Pemakaian Air	49
3.3.8.3 Debit Pemakaian Air (<i>Base Demand</i>).....	50
3.3.8.4 Perbandingan Sisa Klor dan Tekanan Simulasi dengan Pengukuran Lapangan.....	50
3.3.8.5 Hubungan Jarak, suhu, pH, tekanan dan <i>Escherichia coli</i> terhadap Kadar Sisa Klor	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Umum.....	52
4.2 Fluktuasi Pemakaian dan Debit Air	52
4.3 Konsumsi Air Pelanggan.....	55
4.4. Hasil Pengukuran Lapangan <i>E. Coli</i> dan Sisa Klor.....	57

4.5 Simulasi Hidrolis Jaringan Distribusi	58
4.5.1 Tekanan (P).....	58
4.5.2 Kecepatan	59
4.6 Simulasi Penyebaran Sisa Klor di Jaringan Distribusi	62
4.7 Analisis Kadar Sisa Klor dan Tekanan Hasil berdasarkan Simulasi <i>Epanet</i>	64
4.8 Analisis Hubungan Sisa Klor Terhadap <i>E. coli</i> dan Jarak, suhu,.....	66
4.9 Analisis Praktik Keinsinyuran.....	68
4.10 Dampak terhadap Masyarakat dan Lingkungan	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA	72



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Kriteria Sistem Distribusi.....	7
Tabel 2. 2. Nilai Koefisien Kekasaran Pipa	13
Tabel 2. 3. Reservoir Pelayanan PDAM Kota Padang Panjang.....	34
Tabel 2. 4. Data Pipa pada Jaringan Distribusi DMA 1 Dan 2	35
Tabel 2. 5. Jumlah Pelanggan Masing-masing Zona Pelayanan.....	36
Tabel 2. 6. Unit IPA PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang	37
Tabel 2. 7. Unit IPA PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang	37
Tabel 2. 8. Karakteristik Air Reservoir Bukit Surungan.....	38
Tabel 3. 1. Waktu Penelitian.....	39
Tabel 3. 2. Lokasi Sampling	44
Tabel 3. 3. Interpretasi Nilai r	51
Tabel 4. 1 Data Fluktuasi Rata-rata Pemakaian Air.....	52
Tabel 4. 2. Rekapitulasi Pemakaian Air oleh Pelanggan Per Node/Junction.....	56
Tabel 4. 3. Perbandingan Nilai RMSE Sisa Klor dan Tekanan Simulasi Epanet dan Pengukuran Lapangan.....	65
Tabel 4. 4. Nilai Korelasi Parameter Terhadap Sisa Klor.....	66



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Bentuk Sistem Cabang	10
Gambar 2. 2. Sistem Distribusi Gridiron	11
Gambar 2. 3. Bentuk Sistem Loop	12
Gambar 2. 4. Breakpoint Chlorination	18
Gambar 2. 5. Pengaruh suhu dan pH terhadap Fraksi Klor Bebas.....	19
Gambar 2. 6. Pembagian Jaringan Distribusi ke dalam DMA.....	28
Gambar 2. 7. Peta Wilayah SPAM PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang ..	31
Gambar 2. 8. Skema Transmisi-Distribusi Zona Bukit Surungan	32
Gambar 2. 9. Peta Jaringan Distribusi Zona Bukit Surungan	33
Gambar 3. 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	40
Gambar 3. 2. Kawasan Penelitian DMA 1 Zona Bukit Surungan	42
Gambar 3. 3. Lokasi Pengambilan Sampel pada DMA 2 Zona Bukit Surungan.....	43
Gambar 3. 4. Sampling Air untuk Pengujian <i>E. coli</i>	46
Gambar 3. 5. Penambahan Indikator <i>Chlorine Free</i> DPD	46
Gambar 3. 6. Pengamatan Sisa Klor	46
Gambar 3. 7. Pengukuran Suhu	46
Gambar 3. 8. Pengukuran pH.....	47
Gambar 3. 9. Pemasangan Alat Manometer.....	49
Gambar 3. 10. Pengukuran Manometer	49
Gambar 3. 11. Diagram Penurunan Konsentrasi Klor	48
Gambar 4. 1. Fluktuasi Pemakaian Air Mingguan a) DMA 1 dan b) DMA 2.....	54
Gambar 4. 2. Pola Pemakaian Air Pada <i>Outlet Reservoir</i>	55
Gambar 4. 3. Konsentrasi <i>E.coli</i> dan Sisa Klorin terhadap jarak dalam DMA 1 dan DMA 2	58
Gambar 4. 4. Simulasi Tekanan DMA 1	59
Gambar 4. 5. Simulasi Tekanan DMA 2.....	60
Gambar 4. 6. Simulasi Kecepatan DMA 1.....	61
Gambar 4. 7. Simulasi Kecepatan DMA 2.....	62
Gambar 4. 8. Nilai Konsentrasi Klor a) DMA 1 b) DMA 2	64

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas air perlu dikontrol secara ketat agar memenuhi standar kesehatan dan keselamatan serta mencegah kontaminasi, terutama oleh patogen dan senyawa kimia beracun. Salah satu disinfektan yang paling banyak digunakan adalah klorin. Selain harganya yang murah, klorin juga efektif dalam membasmi berbagai macam patogen (Gil et al., 2015). Sisa klor diperlukan untuk mencegah timbulnya pencemaran dan pertumbuhan kembali bakteri pada air minum (Berteli et al. 2018). Pembubuhan klor perlu diperhatikan karena jika kadar klor berlebih akan bersifat toksik yang merugikan kesehatan konsumen (Zheng et al. 2015). Kadar klor maksimal berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 736/Menkes/Per/VI/2010 yaitu 1 mg/l pada *outlet* reservoir dan minimal 0,2 mg/l pada titik terjauh jaringan distribusi. Konsentrasi sisa klor dapat menurun karena adanya reaksi *bulk reaction* akibat faktor komponen terlarut dalam air seperti mineral dan mikroorganisme patogen dan *pipe wall reaction* akibat reaksi pada dinding pipa yang terjadi pada air ketika mengalir di jaringan distribusi (Devarakonda 2010).

Parameter lingkungan seperti pH, suhu, dan tekanan dapat memengaruhi kadar klor di jaringan. Peningkatan pH dapat menurunkan keaktifan asam hipoklorit (HOCl) (Achmit et al. 2018). Suhu dapat meningkatkan koefisien peluruhan klor akibat reaksi antara klor dengan air (Avilaa et al. 2020). Sementara itu, tekanan yang meningkat dapat menurunkan sisa klor dalam jaringan perpipaan (Shamsaei et al. 2013). Pertambahan jarak menyebabkan penurunan kadar sisa klor akibat reaksi dengan komponen terlarut dan lapisan dinding pipa pada jaringan distribusi (Baker 2016). Simulasi hidrolis dan kondisi kualitas air pada aliran perpipaan distribusi dapat dilakukan dengan pemograman. Program ini dapat menggambarkan tekanan air, aliran air, serta penyebaran kadar bahan kimia seperti klor di sistem perpipaan (Rossman 2000). *Software Epanet* merupakan program yang sering digunakan dalam perpipaan distribusi pada suatu pelayanan air minum.

Perusahaan Umum Daerah (PERUMDA) Air Minum Kota Padang Panjang yang melayani penyediaan air minum di kawasan tersebut diwajibkan memenuhi kriteria yang menjamin kualitas, kuantitas, dan kontinuitas distribusi air minum. PERUMDA ini telah menerapkan Zona Air Minum Prima (ZAMP) di wilayah pelayanan Silaing Bawah dan direncanakan akan dikembangkan program yang sama di wilayah lainnya, yaitu di DMA 1 dan 2 Bukit Surungan. ZAMP adalah zona khusus yang dirancang untuk menyediakan air berkualitas siap minum. Jaringan distribusi di Zona Bukit Surungan menerapkan metode District Meter Area (DMA), yaitu area yang dilengkapi dengan meter induk untuk mencatat aliran masuk, serta memiliki batas-batas untuk memantau pengendalian tekanan, kualitas air, dan kehilangan air (Alvisi & Marco, 2014). Karena belum ada pengukuran dan pelaporan kinerja sistem jaringan DMA 2, terutama terkait sisa klor dan tekanan, diperlukan kajian lebih lanjut untuk mengukur efektivitas kawasan ini.

Penelitian ini dilakukan dengan pengujian kadar sisa klor dan kandungan bakteri *Escherichia coli* pada wilayah *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 Zona Bukit Surungan. Selanjutnya, analisis kadar sisa klor dan tekanan menggunakan *software epanet* yang dibandingkan dengan pengukuran di lapangan serta analisis hubungan suhu, pH, tekanan, jarak dan *Escherichia coli* terhadap kadar sisa klor. Hasil analisis ini diharapkan dapat menjadi informasi bagi konsumen dan dapat menjadi acuan bagi perusahaan air minum dalam peningkatan kualitas distribusi air kepada pelanggan.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian tugas akhir ini adalah menguji keakuratan simulasi *software Epanet* dibandingkan dengan pengukuran lapangan terhadap kandungan sisa klor dan tekanan. Selain itu juga untuk mengetahui pengaruh parameter lingkungan (suhu dan pH) dan aspek hidrolis (tekanan dan jarak) serta *E. coli* terhadap sisa klor di jaringan distribusi *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

Tujuan penelitian adalah:

1. Analisis penyebaran sisa klor pada jaringan distribusi DMA 1 dan 2 Bukit Surungan menggunakan *software Epanet 2.2*.
2. Membandingkan kadar sisa klor dan nilai tekanan antara hasil pengukuran di lapangan dengan *software Epanet 2.2*.

3. Analisis hubungan sisa klor terhadap suhu, pH, tekanan, jarak dan *E. coli* pada jaringan distribusi *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- a. Menjadi referensi bagi PERUMDA Air Minum Kota Padang untuk meningkatkan kualitas pengelolaan air sesuai dengan standar yang ditetapkan.
- b. Membantu PERUMDA Air Minum Kota Padang memenuhi kriteria minimum yang harus dipenuhi dalam mengelola sistem penyediaan air minum bagi pelanggan.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini mencakup:

- a. Penelitian dilakukan di *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 di zona Bukit Surungan, PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.
- b. Parameter yang diukur di lapangan meliputi tekanan, suhu, pH, dan sisa klor.
- c. Parameter yang dianalisis di laboratorium adalah kandungan bakteri *Escherichia coli* menggunakan metode uji MPN.
- d. Penyebaran sisa klor dan tekanan dianalisis menggunakan software *Epanet 2.2*.
- e. Analisis perbandingan kadar sisa klor dan tekanan dilakukan antara hasil pengukuran lapangan dan hasil simulasi software *Epanet* menggunakan uji *Root Mean Square Error* (RMSE).
- f. Hubungan antara sisa klor dengan jarak, suhu, pH, tekanan, dan *E. coli* dianalisis menggunakan regresi dan korelasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini mencakup latar belakang, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur yang berhubungan dengan penelitian dan penyusunan laporan Tugas Akhir seperti kajian mengenai kadar sisa klor dan *Escherichia coli* pada jaringan distribusi *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

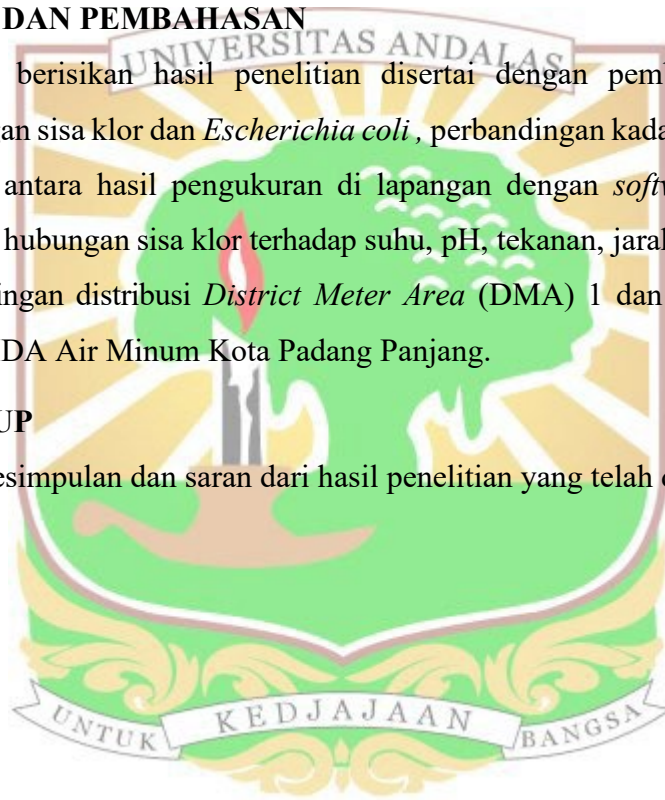
Bab ini menjelaskan tentang tahapan penelitian yang dilakukan, metode sampling, metode analisis laboratorium, lokasi dan waktu penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan hasil penelitian disertai dengan pembahasan mengenai kandungan sisa klor dan *Escherichia coli*, perbandingan kadar sisa klor dan nilai tekanan antara hasil pengukuran di lapangan dengan *software Epanet*, serta Analisis hubungan sisa klor terhadap suhu, pH, tekanan, jarak, *Escherichia coli* pada jaringan distribusi *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Minum

Menurut Peraturan Menteri Kesehatan (PermenKes) No. 492 Tahun 2010, air minum adalah air yang melalui proses pengolahan atau tanpa proses pengolahan yang memenuhi syarat kesehatan dan dapat langsung diminum. Air minum layak dikonsumsi jika memenuhi persyaratan fisik, mikrobiologis, kimiawi dan radioaktif yang tercantum dalam parameter wajib dan tambahan (Permenkes, 2010).

2.1.1 Kualitas Air Minum

Persyaratan kualitas air minum adalah serangkaian standar dan parameter yang ditetapkan untuk memastikan bahwa air yang dikonsumsi oleh manusia aman dan bebas dari kontaminasi yang berpotensi membahayakan kesehatan. Standar ini mencakup aspek fisik, kimia, mikrobiologi, dan radiologi, yang mencakup kejernihan, bau, rasa, tingkat keasaman (pH), kandungan logam berat, keberadaan bakteri patogen, dan zat-zat kimia berbahaya lainnya. Tujuan utama dari persyaratan ini adalah melindungi kesehatan masyarakat dengan memastikan bahwa air yang digunakan untuk minum dan keperluan sehari-hari memenuhi kualitas yang layak untuk konsumsi manusia. Regulasi ini biasanya ditetapkan oleh otoritas kesehatan lokal maupun internasional, seperti WHO, dan dilaksanakan melalui pengawasan dan pengujian rutin.

Di Indonesia, Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 tahun 2010 menetapkan bahwa air minum aman bagi kesehatan manusia jika memenuhi persyaratan fisik, mikrobiologis, kimiawi, dan radioaktif yang dimuat dalam parameter wajib dan parameter tambahan. Setiap penyedia air minum harus mematuhi parameter wajib yang merupakan persyaratan utama kualitas air minum. Salah satu parameter wajib persyaratan kualitas air minum yang berhubungan langsung dengan kesehatan adalah parameter mikrobiologi. Dalam hal ini, kandungan maksimum *Escherichia coli* dalam air minum adalah 0 per 100 ml sampel.

2.1.2 Kuantitas Air Minum

Kuantitas air minum mengacu pada jumlah air yang diperlukan untuk mendukung aktivitas penggunaan air sehari-hari. Dalam penyediaan air minum, persyaratan kuantitas didasarkan pada ketersediaan air baku, yang merupakan air yang siap diolah menjadi air minum. Air yang disediakan harus cukup untuk memenuhi kebutuhan wilayah serta

jumlah penduduk yang dilayani. Selain itu, kuantitas juga ditentukan oleh standar debit air minum, yaitu jumlah air yang dialirkan kepada pelanggan, yang harus sesuai dengan kebutuhan mereka (Agustina, 2007). Standar kebutuhan air di Indonesia ditetapkan oleh Direktorat Jenderal Cipta Karya Departemen Pekerjaan Umum pada tahun 2004 didasarkan pada klasifikasi kota.

2.1.3 Kontinuitas Air Minum

Persyaratan kontinuitas bertujuan untuk memastikan bahwa pasokan air baku dapat diperoleh secara berkelanjutan dengan fluktuasi debit yang tetap stabil, baik pada musim hujan maupun musim kemarau. Menjaga kontinuitas penyediaan air minum adalah langkah penting untuk memastikan ketersediaan air minum yang konsisten. Dengan kontinuitas pengaliran air minum, pasokan air akan tersedia selama 24 jam setiap hari (Pemerintah Indonesia, 2015). Untuk menjaga kontinuitas kinerja penyediaan air minum, beberapa standar yang harus dipenuhi dalam jaringan distribusi menurut (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2005):

1. Unit distribusi harus meliputi sistem perpompaan, jaringan distribusi, bangunan penampungan, alat ukur dan peralatan pemantauan.
2. Unit distribusi harus menjamin kuantitas dan kualitas air serta kontinuitas aliran.
3. Kontinuitas aliran air harus memberikan jaminan pasokan 24 jam sehari.

2.1.4 Persyaratan Tekanan Air Minum

Persyaratan tekanan dalam memaksimalkan tingkat pelayanan distribusi yaitu sisa tekan harus memperhatikan persyaratan minimum, yaitu 0,5 pada titik pipa pelayanan pelanggan sebagaimana tercantum pada **Tabel 2.1**. Tekanan yang tidak memadai dapat menyebabkan aliran air tidak sampai ke konsumen, sedangkan tekanan yang berlebihan dapat menyebabkan pukulan air yang dapat merusak peralatan perpipaan.

2.2 Sistem Penyediaan Air Minum

Salah satu komponen sistem SPAM menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 122 Tahun 2015 adalah untuk mengimplementasikan, memantau, dan menghentikan aktivitas unit-unit agar dapat beroperasi secara berkelanjutan di seluruh atau sebagian unit, yang meliputi (Pemerintah Indonesia, 2015):

1. Unit air baku

Unit air baku terdiri dari berbagai komponen seperti bangunan penampungan air, fasilitas pengambilan, alat pengukur dan pemantau, sistem pemompaan, serta sarana transportasi dan perlengkapannya. Unit ini berperan dalam proses pengambilan dan penyediaan air baku. Air yang diambil harus memenuhi standar kualitas yang ditetapkan untuk penyediaan air minum, sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Tabel 2. 1. Kriteria Sistem Distribusi

No.	Uraian	Kriteria Pipa Distribusi
1	Debit perencanaan (QPuncak)	Kebutuhan air jam puncak $Q_{peak} = F_{peak} \times Q_{rata-rata}$
2	Faktor jam puncak (Fpeak)	1,15-3
3	Kecepatan aliran dalam pipa	
	a) Kecepatan minimum (Vmin)	0,3-0,6 m/s
	b) Kecepatan maksimum (Vmaks)	
	PVC	3,0-4,5 m/s
	DCIP	6,0 m/s
4	Tekanan air dalam pipa	
	a) Tekanan minimum (Hmin)	0,5-1,0 atm, pada titik jangkauan pelayanan terjauh
	b) Tekanan maksimum (Hmaks)	
	Pipa PVC	6-8 atm
	Pipa DCIP	10 atm
	Pipa PE 100	12,4 Mpa
	Pipa PE 80	9,0 Mpa

Sumber: (Permenkes, 2010)

2. Unit produksi

Unit produksi adalah fasilitas dan infrastruktur yang digunakan untuk mengolah air baku menjadi air minum melalui berbagai proses fisik, kimia, dan/atau biologis. Fasilitas ini meliputi gedung pengolahan beserta perlengkapannya, perangkat operasional, alat ukur dan pemantau, serta bangunan untuk menampung air minum.

3. Unit distribusi

Unit distribusi mencakup sistem perpompaan, jaringan distribusi, bangunan penyimpanan, alat ukur, dan peralatan pemantauan. Tugas unit distribusi adalah menjamin kuantitas dan kualitas air serta kontinuitas aliran, memastikan distribusi air berlangsung selama 24 jam sehari.

4. Unit pelayanan

Unit pelayanan meliputi sambungan rumah, hidran umum, dan hidran kebakaran. Untuk memantau layanan pada sambungan rumah dan hidran umum, harus dipasang

alat ukur berupa meter air. Agar tetap akurat, meter air harus diperiksa secara rutin oleh lembaga yang berwenang.

Proses pengolahan air minum penting untuk air baku menjadi air yang memenuhi standar kualitas air minum. Proses ini melibatkan beberapa langkah, termasuk koagulasi untuk menggabungkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar, flokulasi untuk memperbesar flok, sedimentasi untuk mengendapkan flok yang lebih besar, filtrasi untuk menyaring sisa-sisa partikel dan kontaminan, serta disinfeksi untuk membunuh mikroorganisme patogen menggunakan bahan seperti klorin atau sinar ultraviolet (UV) (PermenPU, 2007). Pemilihan proses dan desain unit dalam instalasi pengolahan air dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti karakteristik air baku, volume air yang diproses, standar kualitas yang harus dicapai, serta kemudahan dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Faktor-faktor ini juga mencakup ketersediaan teknologi dan tenaga terampil, serta aspek ekonomis terkait biaya pembangunan dan operasional instalasi (Hermanto, 2014).

2.3 Jaringan Distribusi Air Minum

Unit distribusi berfungsi sebagai media untuk menyalurkan air minum dari pipa transmisi menuju unit pelayanan (PermenPU, 2007). Tugas utama sistem distribusi adalah mendistribusikan air yang telah memenuhi standar ke seluruh area layanan. Sistem ini mencakup elemen-elemen seperti sistem pengaliran air bersih, sistem pemompaan, dan reservoir distribusi.

2.3.1 Sistem Pengaliran Air

Sistem pengaliran yang dapat digunakan meliputi (Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR, 2007):

1. Sistem Gravitasi

Pengaliran air dari sumber ke lokasi tertentu dilakukan dengan memanfaatkan energi potensial yang dimiliki air, yang berasal dari perbedaan ketinggian antara lokasi sumber air dan lokasi reservoir.

2. Cara Pemompaan

Sistem ini mengolah air dari sumber menuju reservoir dengan memberikan energi kinetik pada aliran air, sehingga air dapat mencapai lokasi reservoir yang berada di ketinggian lebih tinggi.

3. Cara Gabungan

Sistem ini mengolah air dari sumber ke reservoir dengan memanfaatkan dua metode transmisi: sistem gravitasi dan sistem pompa.

2.3.2 Reservoir Distribusi

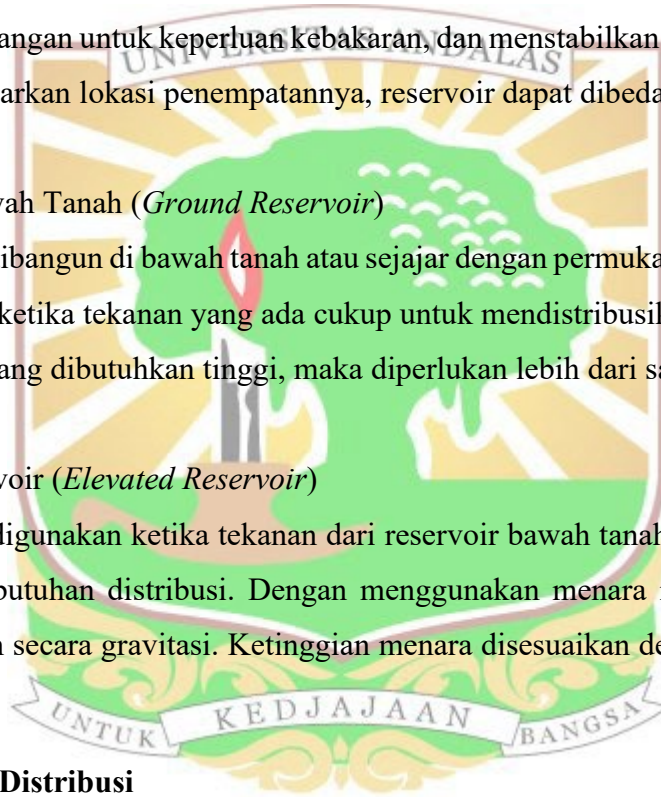
Reservoir distribusi berfungsi sebagai penampung untuk mengatasi fluktuasi pasokan air, menyediakan cadangan untuk keperluan kebakaran, dan menstabilkan tekanan dalam pipa distribusi. Berdasarkan lokasi penempatannya, reservoir dapat dibedakan menjadi (Joko, 2010).

1. Reservoir Bawah Tanah (*Ground Reservoir*)

Reservoir ini dibangun di bawah tanah atau sejajar dengan permukaan tanah. Reservoir ini digunakan ketika tekanan yang ada cukup untuk mendistribusikan air minum. Jika kapasitas air yang dibutuhkan tinggi, maka diperlukan lebih dari satu reservoir bawah tanah.

2. Menara Reservoir (*Elevated Reservoir*)

Reservoir ini digunakan ketika tekanan dari reservoir bawah tanah tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan distribusi. Dengan menggunakan menara reservoir, air dapat didistribusikan secara gravitasi. Ketinggian menara disesuaikan dengan tekanan yang diperlukan.



2.3.3 Perpipaan Distribusi

Jaringan distribusi adalah rangkaian pipa yang terhubung dan digunakan untuk menyalurkan air ke konsumen. Tata letak distribusi dipengaruhi oleh kondisi topografi area layanan dan lokasi instalasi pengolahan. Jaringan perpipaan distribusi dapat dikategorikan sebagai berikut (Joko, 2010):

1. Sistem Cabang

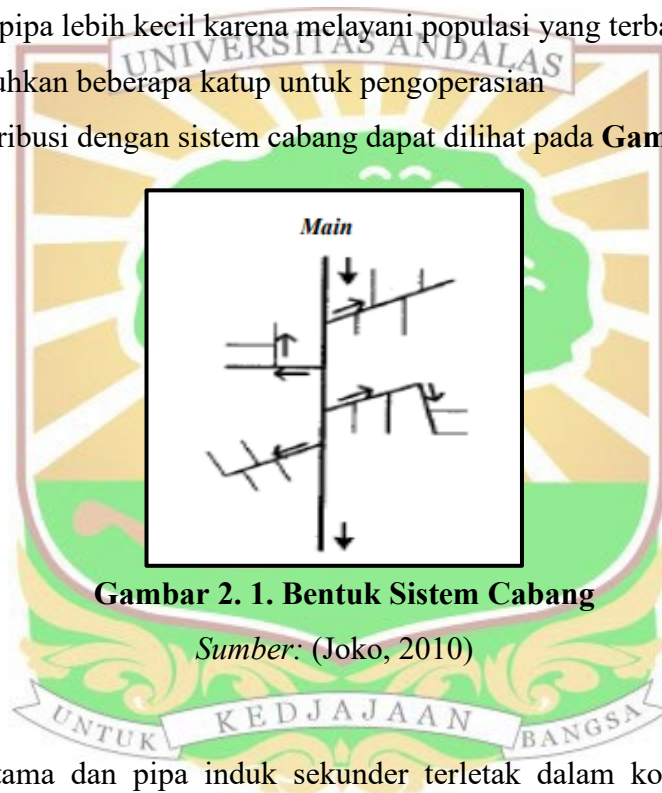
Bentuk cabang dengan jalur buntu mirip dengan cabang pohon. Pipa induk utama terhubung ke pipa induk sekunder, dan pipa induk sekunder terhubung ke pipa pelayanan utama yang menyuplai air minum ke gedung. Dalam sistem pipa dengan

jalur buntu, arah aliran air selalu konsisten, dan suatu area mendapatkan pasokan air dari satu pipa saja.

Keuntungan dari pola cabang meliputi:

- a. Sistem ini dan desain jaringan perpipaannya relatif sederhana;
- b. Cocok untuk daerah yang sedang berkembang;
- c. Pengambilan dan tekanan di setiap titik dapat dihitung dengan mudah;
- d. Pipa dapat ditambahkan jika diperlukan pengembangan kota;
- e. Dimensi pipa lebih kecil karena melayani populasi yang terbatas;
- f. Membutuhkan beberapa katup untuk pengoperasian

Jaringan distribusi dengan sistem cabang dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



2. Sistem grid

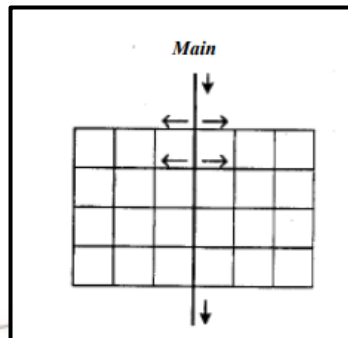
Pipa induk utama dan pipa induk sekunder terletak dalam kotak, dengan saling terhubung antara pipa induk utama, pipa induk sekunder, dan pipa pelayanan utama. Sistem ini sering digunakan karena memiliki keuntungan berikut:

- a. Air dalam sistem dapat mengalir bebas ke berbagai arah tanpa mengalami stagnasi seperti pada pola cabang;
- b. Selama perbaikan pipa, air tetap tersedia dari bagian lain yang terhubung;
- c. Saat terjadi kebakaran, air tersedia dari semua arah;
- d. Kehilangan tekanan di semua titik dalam sistem minimal.

Namun, sistem gridiron juga memiliki kekurangan:

- a. Perhitungan ukuran pipa lebih kompleks;
- b. Memerlukan lebih banyak pipa dan sambungan, sehingga lebih mahal.

Jaringan distribusi dengan sistem gridiron dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2. 2. Sistem Distribusi Gridiron

Sumber: (Joko, 2010)

3. Sistem Loop

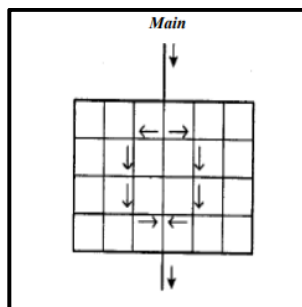
Pipa utama terletak mengelilingi area pelayanan. Pengambilan dibagi menjadi dua bagian, masing-masing mengelilingi batas area layanan dan bertemu kembali di ujungnya. Pipa perlintasan menghubungkan kedua pipa utama tersebut. Di dalam area pelayanan, pipa pelayanan utama terhubung dengan pipa utama. Sistem ini dianggap paling ideal. Jaringan distribusi dengan sistem loop dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.

Kelebihan sistem loop meliputi;

- a. Setiap titik menerima pasokan dari dua arah
- b. Jika terjadi kerusakan pada pipa, suplai air tetap bisa dari arah lain;
- c. Untuk pemadaman kebakaran, air tersedia dari semua arah;
- d. Desain pipa sederhana.

Kekurangan sistem loop meliputi;

- a. Memerlukan lebih banyak pipa;
- b. Mengharuskan penggunaan lebih banyak pipa dan sambungan, sehingga lebih mahal.



Gambar 2. 3. Bentuk Sistem Loop
 Sumber: (Joko, 2010)

2.3.4 Hidrolika Perpipaan Distribusi

Menurut (Ibrahim et al., 2011) dalam jaringan distribusi air minum, terdapat berbagai persamaan hidrolika yang diterapkan untuk sistem distribusi air bersih meliputi;

1. Hukum Bernoulli

Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa energi total pada suatu penampang pipa terdiri dari jumlah energi kecepatan, energi tekanan, dan energi ketinggian, yang dapat diungkapkan melalui persamaan 2.1.

$$\begin{aligned}
 ET_{\text{Tot}} &= \text{Energi ketinggian} + \text{Energi kecepatan} + \text{Energi tekanan} \\
 &= z + \frac{P}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.1)
 \end{aligned}$$

Keterangan:

- γ_w = berat jenis air (kg/m^3)
- v_1 dan v_2 = kecepatan aliran di titik 1 dan 2 (m/det),
- g = percepatan gravitasi (m/det^2)
- Z_1 dan Z_2 = tinggi elevasi di titik 1 dan 2 dari garis yang ditinjau (m)

2. Hukum Kontinuitas

Hukum kontinuitas yang dituliskan:

$$Q_1 = Q_2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

- Q_1 = debit pada penampang 1 (m^3/det)
- Q_2 = debit pada penampang 2 (m^3/det)
- A_1 = luas penampang pada penampang 1 (m^2)
- A_2 = luas penampang pada penampang 2 (m^2)
- V_1 = kecepatan pada penampang 1 (m/det)
- V_2 = kecepatan pada penampang 2 (m/det)

3. Kehilangan Tekanan Air

Selama perjalanannya melalui pipa, air mengalami kehilangan energi. Kehilangan tekanan (h_f) dalam pipa disebabkan oleh gesekan antara fluida dan dinding pipa. Kehilangan tekanan ini terbagi menjadi dua jenis meliputi (Triatmadja, 2008):

a. *Mayor Losses*

Mayor Losses adalah kehilangan tekanan yang terjadi sepanjang pipa lurus akibat gesekan antara fluida yang mengalir dan dinding pipa. Perhitungan kehilangan tekanan ini dapat dilakukan dengan menggunakan rumus Hazen-Williams pada persamaan 2.4 – 2.6.

$$Q = 0,2785 C D^{2,63} S^{0,54} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$H_f = \frac{Q^{1,85}}{(0,2785 D^{2,63} C)^{1,85}} \times L \dots\dots\dots (2.5)$$

$$S = \frac{h_f}{L} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

- C = Koefisien Kekasaran Pipa
- S = Kemiringan atau *slope* garis tenaga
- Q = Debit ($m^3/detik$)
- D = Diameter pipa (m)
- h_f = Kehilangan Energi (m)
- L = Panjang Pipa (m)

Faktor C menggambarkan kondisi fisik pipa, seperti kehalusan dindingnya, yang mencerminkan jenis dan usia pipa tersebut. Nilai koefisien kekasaran pipa dapat ditemukan dalam **Tabel 2.2.**

Tabel 2. 2. Nilai Koefisien Kekasaran Pipa

Material	Nilai C
Asbes Cement	120
Poly Vinyl Chloride (PVC)	120-140
High Density Poly Ethilene (HDPE)	130
Medium Density Poly Ethilene (MDPE)	130
Ducatile Cast Iron Pipe (DCIP)	110
Besi Tuang, Cast Iron (CIP)	110
Galvanized Iron Pipe (GIP)	110
Steel Pipe (Pipa Baja)	110

Sumber: (Rossman, 2000)

Kehilangan tekanan yang disebabkan oleh karakteristik fisik pipa dan fluida yang mengalir dapat dihitung menggunakan persamaan Darcy-Weisbach.

$$hf = f \times \frac{L v^2}{D 2g} \dots\dots\dots (2.7)$$

keterangan:

- D = Diameter pipa (m)
- hf = Kehilangan tekanan (m)
- L = Panjang pipa (m)
- v = Kecepatan aliran (m/detik)
- f = Koefisien kekasaran pipa
- g = Kecepatan gravitasi (m/detik²)

b. *Minor Losses*

Minor Losses adalah kehilangan tekanan yang terjadi di lokasi-lokasi di mana terjadi perubahan dalam karakteristik aliran, seperti pada belokan, katup, dan aksesoris pipa.

$$hf = K \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

- hf = Kehilangan tekanan/ *head loss* (m)
- k = Besarnya *minor head loss*
- v = Kecepatan aliran (m/s)
- g = Gaya gravitasi (m/s²)

2.4 Disinfeksi

Disinfeksi adalah metode yang digunakan untuk menginaktivasi atau membunuh mikroorganisme patogen yang ada dalam air minum. Tujuan utama disinfeksi adalah untuk memusnahkan mikroorganisme penyebab penyakit seperti virus (misalnya poliovirus), bakteri (seperti penyebab kolera, disentri, dan tifus), serta mikroorganisme lainnya. Seiring waktu, tujuan disinfeksi juga meluas untuk mengoksidasi materi organik dan anorganik (seperti Fe dan Mn), menghilangkan bau dan rasa, serta mengontrol pertumbuhan mikroorganisme (Ali, 2010).

Jenis-jenis disinfeksi dalam air minum meliputi (LeChevallier, 2013):

1. Disinfeksi Fisik

Metode ini menggunakan panas, seperti merebus air selama 15–20 menit, untuk membunuh bakteri atau mikroorganisme lain yang dapat menyebabkan penyakit yang ditularkan melalui air. Metode ini sama dengan pasteurisasi susu, yang melibatkan

pemanasan pada suhu 161°C selama 15 detik. Namun, kelemahan dari metode ini adalah tidak adanya efek residu yang dapat memberikan perlindungan tambahan selama waktu kontak dan jarak tertentu.

2. Disinfeksi Ultraviolet

Metode ini memanfaatkan radiasi ultraviolet dengan panjang gelombang 200-295 nm untuk membunuh mikroorganisme. Air dipaparkan pada sinar UV melalui lapisan film dengan ketebalan sekitar 120 mm.

3. Disinfeksi Kimia

Metode ini menggunakan berbagai bahan kimia, termasuk halogen seperti klorin, bromin, dan iodin, serta ozon, hidrogen peroksida, kalium permanganat, dan senyawa lain seperti alkohol, fenol, logam berat, senyawa amonium kuartener, sabun, serta deterjen sintetis. Senyawa ini digunakan untuk membunuh mikroorganisme dalam proses pengolahan air.

2.5 Chlorine

Chlorine atau klorin merupakan unsur yang sangat reaktif dan cenderung membentuk senyawa dengan warna kuning kehijauan. Klorin sering digunakan sebagai desinfektan dalam pengolahan air minum.

Disinfeksi menggunakan klorin, perlu memperhatikan hal berikut (Sofia et al., 2016).

1. Kebutuhan Klor untuk Disinfeksi

Jumlah klor yang diperlukan untuk disinfeksi tergantung pada kualitas air baku yang digunakan. Karena kualitas air dapat bervariasi dari waktu ke waktu, jumlah klor yang dibutuhkan juga dapat berubah.

2. Konsentrasi Maksimum dalam Disinfeksi

Klor memiliki batas konsentrasi tertentu yang masih aman bagi manusia. Kelebihan dosis klor dapat menyebabkan bau yang tidak menyenangkan, perubahan rasa, dan dampak negatif terhadap kesehatan manusia.

2.5.1 Jenis Klor

Beberapa jenis senyawa klor yang dapat digunakan dalam pengolahan air minum sebagai desinfektan antara lain;

1. *Liquid Chlorine*

Klorin cair adalah bentuk gas klorin yang dikondisikan pada tekanan dan suhu tertentu sehingga menjadi cair. Untuk menjaga agar klorin tetap dalam keadaan cair, diperlukan tekanan sekitar 2,66 atmosfer pada suhu 0°C dan 41 atmosfer pada suhu 100°C. Untuk menangani tekanan tinggi ini, klorin cair disimpan dalam tabung baja atau besi. Pada kondisi udara luar, klorin cair berubah menjadi gas, sehingga injeksi dapat dilakukan dengan menghubungkan tabung ke pipa dan mengatur debit serta tekanannya. Klorin gas tidak korosif di udara kering, tetapi sangat korosif di udara lembab. Kelarutan gas klorin dalam air dipengaruhi oleh suhu, pH, dan konsentrasi garam terlarut, yang menentukan kadar klorin yang tersedia dalam bentuk bebas.

2. Senyawa Hipoklorit

Hipoklorit adalah jenis senyawa klor dengan potensial oksidasi yang tinggi yang mirip dengan potensial oksidasi gas klor. Hipoklorit dihasilkan dari hidrolisis garam – garam klorida yang penyebarannya dipengaruhi oleh pH dan suhu air. Menurut Mursid, 1991 senyawa Hipoklorit terdiri atas:

- a. *Sodium Hypochlorite* (NaOCl) merupakan garam yang mengandung klorin dalam kisaran 5 hingga 15%. Pemilihan konsentrasi larutan dan lokasi penyimpanannya dipengaruhi oleh sifat titik beku larutan tersebut. Titik beku terendah tercapai sekitar -20°F pada konsentrasi 18%, sementara larutan dengan konsentrasi 5% akan membeku pada sekitar 10°F dan 22°F .
- b. *Calcium Hypochlorite* ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) atau Kaporit adalah padatan berbentuk bubuk putih yang tidak menyerap kelembapan, bersifat korosif, berbau klorin, dan mengandung klorin tersedia sebanyak 60-70%. Di Indonesia, kaporit banyak digunakan sebagai desinfektan untuk air minum, terutama oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM).

3. Kalsium hipoklorit (CaOCl_2)

Kandungan klorin yang tersedia dalam senyawa ini berkisar antara 25 hingga 37%. Senyawa ini tidak stabil dan mudah terurai, sehingga harus disimpan dalam drum di tempat yang sejuk dan kering. Chloride of Lime mengandung kapur yang tidak larut dalam air dan menghasilkan partikel tersuspensi yang menyebabkan kekeruhan. Sebelum digunakan, senyawa ini harus dilarutkan terlebih dahulu dalam tangki

penjenuh untuk mengendapkan kapur, dan kemudian larutan klorin dipisahkan untuk diinjeksikan.

4. Klorin dioksida (ClO_2)

Chlorine dioksida jarang digunakan sebagai disinfektan dalam bentuk gas berwarna hijau kekuningan pada suhu kamar. Senyawa ini cepat terdegradasi oleh sinar ultraviolet serta sensitif terhadap suhu dan tekanan, dan dapat meledak dengan mudah. Potensi oksidasinya hampir setara dengan asam hipoklorit. Chlorine dioksida dapat dihasilkan dari campuran gas klorin dan natrium hipoklorit, namun tidak stabil dalam air. Senyawa ini mudah berubah bentuk dan potensial oksidasinya dipengaruhi oleh perubahan pH atau kehadiran ammonia.

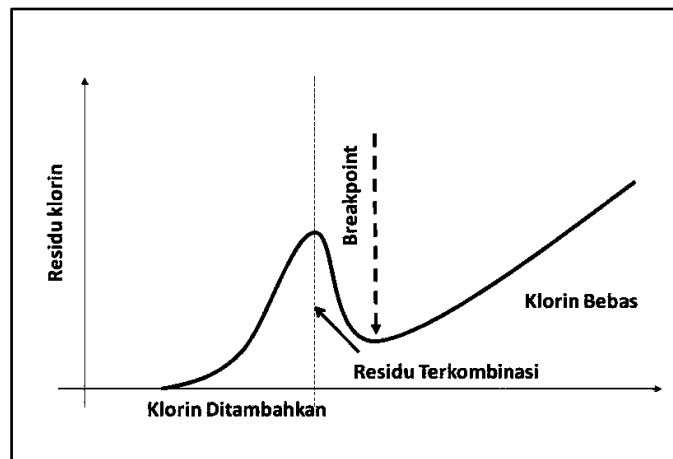
2.5.2 Klorinasi

Klorinasi adalah metode pengolahan air yang bertujuan untuk membunuh mikroorganisme dan mengoksidasi senyawa kimia yang terdapat dalam air. Teknik ini menggunakan Cl_2 yang pertama kali diperkenalkan oleh John L. Leal dengan penggunaan kalsium hipoklorit ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) untuk disinfeksi air dalam pipa. Klor sebagai desinfektan bisa ditemukan dalam bentuk kalsium hipoklorit, gas klor, natrium hipoklorit (NaOCl), atau hipoklorit (HOCl). Kaporit yang merupakan senyawa kimia, bersifat korosif pada konsentrasi tinggi, tetapi pada konsentrasi rendah digunakan sebagai penjernih air (Alaerts & Santika, 1987).

Hubungan antara dosis penambahan klor dan residu klor aktif membentuk grafik klorinasi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Reaksi yang berlangsung sejak awal pemberian klor dapat dibagi menjadi empat tahap sebagai berikut (Winarno, 1992):

1. Pada Tahap 1, klorin dipecah oleh senyawa pereduksi, dan pada tahap ini belum tampak adanya residu klor. Air yang mengandung banyak bahan organik dapat menyerap klorin tersebut.
2. Pada Tahap 2, fase di mana terbentuk senyawa kloramin dan kloro-organik, atau combined available chlorine (klor yang tersedia dalam bentuk terikat). Pada tahap ini, terjadi reaksi antara amonia dan klorin yang menghasilkan kloramin, serta reaksi antara senyawa organik dan klorin yang membentuk kloro-organik.

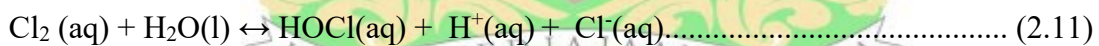
3. Pada Tahap 3, gas nitrogen (N₂) terbentuk dan titik retak (break point) tercapai. Kebutuhan klorin adalah jumlah klorin yang diperlukan untuk mencapai titik retak tersebut.
4. Tahap 4 adalah fase setelah melewati titik retak (breakpoint), di mana hanya klorin bebas yang tersedia. Pada titik ini, semua amonia telah diubah menjadi gas N₂ yang keluar dari larutan sebagai gelembung, meskipun masih ada sedikit kloramin yang tersisa.



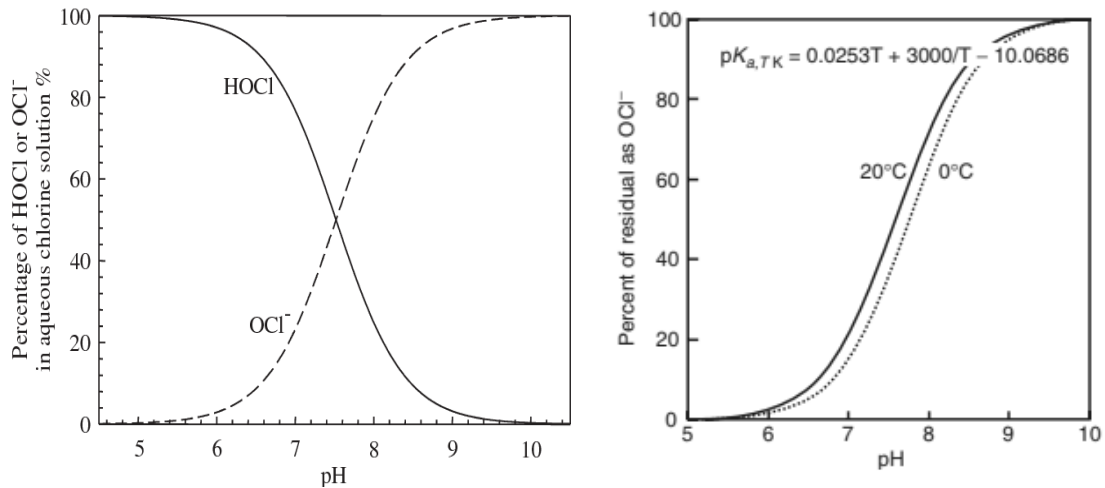
Gambar 2. 4. Breakpoint Chlorination

Sumber : (Ali, 2010)

Klorinasi dilakukan dengan menambahkan klorin ke dalam air yang telah difiltrasi, sebagai bagian dari proses pemurnian air. Reaksi antara klorin dan air menghasilkan asam hipoklorit (HOCl) melalui reaksi berikut (Pizzi, 2010).



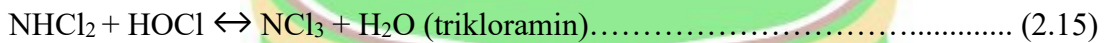
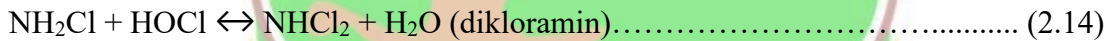
Pada reaksi (2.11), gas klorin bereaksi dengan air, menyebabkan penurunan pH air karena pembentukan ion H⁺. Sebaliknya, pada reaksi (2.12), kaporit bereaksi dengan air, sehingga pH air meningkat akibat pembentukan Ca(OH)₂ yang bersifat basa. HOCl dan OCl⁻ adalah bentuk klor aktif atau klor bebas. HOCl adalah bentuk klor bebas yang paling efektif sebagai disinfektan dibandingkan dengan OCl⁻. Sementara itu, Cl⁻ adalah bentuk klor yang tidak aktif. Cl₂, HOCl, dan OCl⁻ adalah sisa klor aktif yang bersifat toksik bagi mikroorganisme (Ali, 2010).



Gambar 2. 5. Pengaruh suhu dan pH terhadap Fraksi Klor Bebas

Sumber: (Ali, 2010)

Distribusi antara HOCl dan OCl⁻, tergantung pada pH dan suhu, digambarkan pada Gambar 2.5. Asam hipoklorit (HOCl) memiliki kinetika disinfeksi yang lebih cepat dibandingkan dengan ion hipoklorit (OCl⁻). Klor yang bereaksi dalam air juga akan berinteraksi dengan amonia, menghasilkan kloramin sebagai berikut (Crittenden et al., 2012):



Klorin merupakan senyawa yang cukup stabil dalam air pada pH rendah dan bereaksi lebih lambat dengan zat organik. Bentuk senyawa-senyawa klorin dalam air diperlihatkan dalam persamaan berikut (Crittenden et al., 2012):

1. Klorin bebas HOC + Cl⁻
2. Klorin Gabungan NH₂Cl + NHCl₂ + NCl₃
3. Total Klorin Cl bebas + Cl Gabungan

HOCl dapat dengan mudah menembus lapisan pelindung bakteri yang bermuatan negatif, sehingga efektif dalam membunuh bakteri tersebut. Ketika klorin dilarutkan dalam air, ia bereaksi dengan semua zat organik dan anorganik yang ada. Klorin yang telah bereaksi tidak lagi efektif sebagai desinfektan. Sisa klorin setelah reaksi ini disebut sebagai sisa

klorin aktif (HOCl dan OCl⁻). Sisa klorin ini akan tetap berada dalam air hingga digunakan untuk membunuh kontaminasi baru yang masuk (World Health Organisation, 2007).

Selain membunuh bakteri patogen, klorinasi juga berfungsi dalam oksidasi besi, mangan, hidrogen sulfida, senyawa penyebab rasa dan bau, ganggang, serta organisme lumpur lainnya. Klorin adalah desinfektan yang paling umum digunakan karena efektif pada konsentrasi rendah, biaya murah, dan dapat meninggalkan residu jika diterapkan pada dosis yang tepat (Black & Veatch Corporation, 2010).

Klorin dapat berfungsi sebagai oksidan yang efektif untuk berbagai spesies, seperti sulfida, Fe (II), dan Mn (II). Selain itu, klorin juga digunakan untuk menghilangkan senyawa yang menyebabkan rasa dan bau, serta amonia. Berikut adalah aplikasi klorin sebagai oksidan:

1. Oksidasi Sulfida

Dalam lingkungan basa, sulfida cepat bereaksi dengan klorin. Reaksi oksidasi sulfida oleh klorin diperlihatkan pada persamaan 2.17 dan 2.18:



2. Oksidasi Besi

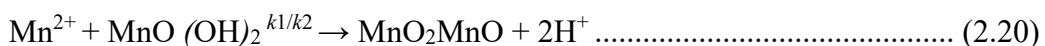
Oksidasi Fe (II) dengan klorin biasanya berlangsung dengan cepat, sesuai dengan stoikiometri dalam reaksi berikut:



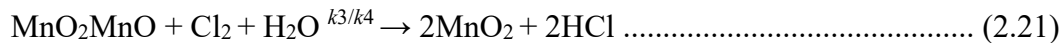
3. Oksidasi Mn (II)

Oksidasi Mn (II) oleh klorin bebas lebih sulit dibandingkan dengan oksidasi menggunakan Fe (II). Dalam larutan, reaksi antara klorin dan Mn (II) berlangsung terlalu lambat untuk digunakan dalam pengolahan air kecuali pH dinaikkan hingga mencapai 9. Saat air yang mengandung klorin dialirkan melalui saringan yang dilapisi dengan media MnO₂, proses yang terjadi melibatkan adsorpsi ke media tersebut, dan Mn (II) yang teradsorpsi secara bertahap dioksidasi menjadi MnO₂ pada permukaan media filter. Inilah langkah-langkah dalam proses oksidasi Mn oleh klorin yaitu:

Langkah 1: Adsorpsi Mn (II) pada MnO₂ permukaan:



Langkah 2: Oksidasi spesies yang teradsorpsi oleh klor:



4. Oksidasi rasa dan bau

Dengan waktu reaksi yang memadai, klorin bebas juga efektif dalam mengatasi berbagai rasa dan bau yang seringkali ditemukan dalam air minum. Klorin dapat mengontrol bau yang paling umum, seperti bau sulfida, bau amis, bau rumput, dan bau rawa.

2.5.3 Kinetika Peluruhan dan Kinetika Penyisihan Mikroorganisme

Instalasi pengolahan air yang memanfaatkan air permukaan atau air tanah yang terpengaruh oleh air permukaan, dan tanpa proses filtrasi, perlu menghitung nilai CT setiap hari. CT adalah indikator efektivitas proses disinfeksi yang bergantung pada pH dan suhu, dan digunakan untuk menghilangkan atau menonaktifkan *Lambliia Giardia* (protozoa) serta virus yang mungkin lolos dari unit pengolahan air.

Sisa klor menjaga efektivitas desinfektan di dalam pipa distribusi air jika terjadi kontaminasi di jaringan. Namun, selama perjalanan di dalam pipa, HOCL dan OCL bereaksi dengan zat-zat yang ada dalam air maupun dengan dinding pipa, sehingga konsentrasinya selalu menurun. Penurunan konsentrasi sisa klor bebas selama aliran melalui jaringan pipa distribusi disebabkan oleh dua reaksi utama yaitu (Sofia et al., 2016):

- a. *Bulk Reaction*
Reaksi bulk adalah penurunan konsentrasi sisa klor bebas akibat reaksi antara sisa klor dengan komponen-komponen yang terlarut dalam air. Komponen ini bisa berupa bahan organik atau mikroorganisme yang terdapat di dalam pipa.
- b. *Pipe Wall Reaction*
Pipe wall reaction merupakan pengurangan konsentrasi sisa klor bebas akibat reaksi sisa klor bebas dengan dinding pipa. Reaksi terjadi disebabkan karena adanya lapisan biologis/biofilm adat karena terjadi korosi pada pipa. Oleh karena itu jenis pipa, diameter pipa serta kondisi pipa menjadi salah satu hal yang harus diperhatikan.

Model kinetik peluruhan klorin dapat dapat dijelaskan dengan **persamaan 2.22** berikut:

$$\frac{dC}{dt} = -CK^n \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

- C = Konsentrasi klorin
- K = Koefisien laju peluruhan massal (*bulk*)
- n = Orde reaksi

Koefisien reaksi dinding (wall reaction) dapat dipengaruhi oleh suhu dan berhubungan dengan usia serta bahan pipa. Epanet dapat menghitung setiap nilai koefisien pipa Kw untuk menggambarkan karakteristik kekasaran pipa tersebut (Rossman, 2000). Epanet membatasi pilihan orde reaksi dinding 0 atau 1, dengan demikian unit Kw adalah massa/area/waktu atau panjang/waktu. Reaksi orde pertama, nilai Kw berkisar antara 0 hingga 5 ft/hari. Semua perhitungan ini dilakukan secara otomatis oleh Epanet berdasarkan pengaturan pada skala molekuler dari zat yang dimodelkan serta angka Reynolds (Rossman, 2000).

2.6 Bakteri *Coliform*

Parameter mikrobiologi adalah salah satu indikator kualitas air, yang mencerminkan keberadaan mikroorganisme patogen yang dapat mencemari air dari berbagai sumber.

Terdapat beberapa faktor utama yang menjadi penyebab kontaminasi dalam hal kualitas bakteriologis yaitu pencemaran fisik dan bakteriologis, kehadiran zat organik alami akibat proses alam, keberagaman mikroorganisme yang hidup dalam air, tingkat pengelolaan dan pemeliharaan fasilitas, sistem jaringan dan distribusi air. (Pitojo, 2003).

Pengujian bakteriologis pada air merupakan persyaratan mikrobiologis wajib dipenuhi. Parameter mikrobiologis yang sering diamati adalah Total Coliform dan *Escherichia coli*. Total Coliform digunakan sebagai indikator karena kepadatannya sebanding dengan tingkat pencemaran air. Patogen pada air seperti virus, protozoa dan parasit dapat terdeteksi oleh bakteri. Selain itu, bakteri ini memiliki daya tahan yang lebih tinggi dibandingkan patogen serta lebih mudah diisolasi dan dibudidayakan (Prayitno, 2009).

Bakteri Coliform adalah jenis bakteri yang termasuk dalam keluarga *Enterobacteriaceae* dan hidup di saluran pencernaan hewan serta manusia. Mereka berfungsi sebagai indikator adanya kontaminasi lingkungan atau kondisi sanitasi yang buruk (Tururaja, T.,

Mogea, 2010). Adanya keterkaitan bakteri *coliform* menjadi salah satu parameter kualitas air yang menandakan adanya kontaminasi *anthropogenic pollutant* dalam suatu perairan. Berbagai penyakit yang berhubungan dengan pencernaan merupakan dampak yang ditimbulkan dari mikroorganisme patogen tersebut (Tururaja, T., Mogea, 2010).

Tiga kelompok bakteri Coliform yang berfungsi sebagai indikator kualitas air minum dan memiliki tingkat risiko adalah (Washington State Department of Health, 2016):

1. *Total Coliform*

Menurut American Public Health Association (APHA, 1998), kelompok Total Coliform adalah bakteri berbentuk batang, aerobik, tidak membentuk spora, gram negatif, dan anaerobik fakultatif yang dapat memfermentasi laktosa, menghasilkan gas pada suhu 35°C dalam waktu 48 jam. Total Coliform ini dikeluarkan dalam jumlah besar (2×10^9 Coliform/hari/kapita) melalui feses manusia dan hewan, namun kotoran manusia bukan satu-satunya asal dari bakteri tersebut. *Total Coliform* dengan konsentrasi rendah yang terdapat di lingkungan (tanah atau vegetasi) dan umumnya tidak berbahaya. Dalam hal pelaksanaan sistem pengelolaan air buangan yang efisien, *Total Coliform* merupakan salah satu indikator terbaik.

2. *Fecal Coliform*

Fecal Coliform adalah subkelompok dari Total Coliform yang terdapat di usus dan kotoran manusia serta hewan, dan dapat memfermentasi laktosa pada suhu 44,5°C. Namun, tidak dapat dibedakan apakah kontaminasi tersebut berasal dari hewan atau manusia. Beberapa penelitian merekomendasikan penggunaan *E. coli* sebagai indikator fekal karena bakteri ini lebih mudah dibedakan dari anggota kelompok *Fecal Coliform*. Meskipun *Fecal Coliform* menunjukkan pola kelangsungan hidup yang mirip dengan bakteri patogen, bakteri ini tidak dirancang khusus untuk mengindikasikan adanya kontaminasi virus dan kista protozoa. Selain itu, *Fecal Coliform* dapat tumbuh kembali di air limbah dalam kondisi yang mendukung (Apha, 1998).

3. *E. coli*

E. coli adalah subkelompok dari *Fecal Coliform*. Bakteri ini biasanya hidup di saluran pencernaan manusia dan hewan yang sehat. Sebagian besar jenis *E. coli* tidak menimbulkan bahaya.

2.6.1 Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Bakteri *Coliform*

Pertumbuhan optimum bakteri terjadi ketika jumlah massa sel atau total massa sel mencapai titik maksimal (Pratiwi, 2008). Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan bakteri meliputi (Nuraeni, 2000):

1. Nutrien

Nutrien adalah substansi yang diperlukan untuk biosintesis dan pembentukan energi.

Nutrisi dibagi menjadi dua kategori berdasarkan kebutuhannya, yaitu:

- a. Makroelemen, yaitu elemen nutrisi yang diperlukan dalam jumlah besar seperti karbon (C), oksigen (O), dan hidrogen (H).
- b. Mikroelemen, yaitu elemen nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah kecil seperti mangan (Mn), zinc (Zn), dan tembaga (Cu).

2. Media Kultur

Media kultur adalah bahan nutrisi yang digunakan untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme di laboratorium. Informasi terkait habitat normal mikroorganisme sangat penting dalam pemilihan media yang cocok untuk pertumbuhan mikroorganisme di laboratorium. Pengelompokan media kultur yang ditentukan berdasarkan konsistensinya, yaitu: media cair dan media padat. Berdasarkan kandungan nutrisinya, media kultur dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, yaitu: media penyubur, media kompleks, media sintetik, media umum, media selektif, media diferensial, dan media khusus.

2.6.2 Dampak Bakteri *Eschericia coli*

Bakteri *Eschericia coli* yang mencemari sumber air minum dapat mengakibatkan penyakit (Jawetz et al., 2007):

1. Diare

Bakteri Total Coliform, termasuk *E. coli*, merupakan salah satu penyebab utama diare di seluruh dunia. *E. coli* sendiri dikenal sebagai penyebab diare yang sangat umum. Berdasarkan sifat virulensinya, *E. coli* dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok.

a. *E. coli* *Enteroinvasive* (EIEC)

Menimbulkan penyakit yang serupa dengan Shigellosis, yang menyerang sel-sel epitel pada mukosa usus.

b. *E. coli* *Enteroagregative* (EAEC)

Diare akut dan kronis (berlangsung lebih dari 14 hari) bisa disebabkan oleh mikroorganisme yang menempel pada mukosa usus. Bakteri ini mengeluarkan enterotoksin dan sitotoksin, yang merusak mukosa usus, menyebabkan produksi lendir yang berlebihan, dan memicu timbulnya diare.

c. *E. coli* *Enteropathogenic* (EPEC)

Merupakan penyebab utama diare pada bayi, terutama di negara berkembang. Bakteri ini menempel pada usus kecil, dan infeksi EPEC menyebabkan diare cair yang sulit diobati serta bersifat kronis.

d. *E. coli* *Enterotoxigenic* (ETEC)

Beberapa strain ETEC menghasilkan eksotoksin yang bersifat labil terhadap panas (LT) serta toksin yang stabil terhadap panas (ST). Infeksi ETEC dapat menyebabkan gejala seperti sakit perut, kadang disertai demam, muntah, dan adanya darah dalam feses.

a. *E. coli* *Enterohemorrhagic* (EHEC) *Serotype*

E. coli yang memproduksi verotoksin, seperti EHEC O157:H7, menghasilkan toksin yang mirip dengan toksin Shiga yang diproduksi oleh strain *Shigella dysenteriae*. Verotoksin ini merusak dinding mukosa, menyebabkan perdarahan.

2. Meningitis

E. coli dan *Streptococcus* adalah bakteri utama penyebab meningitis pada bayi. Sekitar 40% kasus meningitis neonatal merupakan dampak *E. coli*.

3. Pneumonia

Kurang lebih 50% kasus dari *Primary Nosocomial Pneumonia* di rumah sakit *Escherichia coli*.

4. Infeksi Saluran Kemih (ISK)

Bakteri *E.coli* merupakan penyebab infeksi saluran kemih pada sekitar 90% wanita muda. Gejala yang muncul meliputi sering buang air kecil, disuria (rasa sakit atau terbakar saat buang air kecil di uretra), hematuria (adanya sel darah putih dalam urin), dan piuria (urin yang mengandung nanah).

2.7 Aplikasi EPANET 2.2 dalam Analisa Jaringan Distribusi

Environmental Protection Agency Network (Epanet) adalah suatu pemodelan yang digunakan untuk melakukan simulasi hidraulik dan perilaku kualitas air dalam jaringan pipa distribusi air minum bertekanan. Jaringan distribusi air minum mencakup pipa-pipa, percabangan pipa, pompa, tangki air atau reservoir, serta katup-katup (PUPR, 2000). *Epanet* memodelkan aliran air di setiap pipa, tekanan air di setiap titik, konsentrasi bahan kimia yang mengalir dalam pipa seiring waktu, serta simulasi usia air (Rossman, 2000).

Berbagai alat dalam *Epanet* memungkinkan pembuatan layout jaringan distribusi, baik dalam skala besar maupun sistematis, dengan efisien dan mudah. Saat membuat model jaringan distribusi, *Epanet* secara default memberikan label pada node dan pipa yang dibuat. Untuk model skematik, panjang pipa dapat dimasukkan secara manual. Namun, pada model berskala, *Epanet* secara otomatis menghitung panjang pipa berdasarkan panjang garis yang digambar dikalikan dengan skala yang ditentukan (Rossman, 2000).

Data yang diperlukan dalam *Epanet* sangat krusial untuk proses analisis, evaluasi, dan simulasi jaringan distribusi air berbasis *Epanet*. Input data yang diperlukan meliputi peta, node/junction/titik dari komponen distribusi, elevasi – panjang pipa distribusi, diameter dalam pipa, jenis pipa yang digunakan, jenis sumber (mata air, sumur bor, IPAM, dll), spesifikasi pompa (bila menggunakan pompa), beban masing-masing node (besarnya tapping), faktor fluktuasi pemakaian air, konsentrasi klor di sumber.

Output yang dihasilkan diantaranya adalah *hidrolik head* dari masing-masing titik dan tekanan dan kualitas air. *Epanet* dapat melakukan kajian fenomena kualitas air seperti usia air dalam sistem, kehilangan sisa klor, melacak kontaminan.

Tipe simulasi yang dapat dilakukan tergantung dari tujuan model itu dibuat. Umumnya dua tipe yang dapat digunakan yaitu (Özdemir, 2018):

1. Simulasi kondisi tunak (*steady-state simulation*) berfungsi untuk menghitung parameter sistem yang diinginkan, seperti aliran, tekanan, pompa, posisi katup, dan sebagainya, dengan asumsi bahwa kebutuhan hidraulik dan kondisi jaringan tidak berubah seiring waktu.
2. Simulasi periode panjang (*Extended Period Simulation, EPS*) menentukan sifat dinamis suatu sistem seiring berjalannya waktu dan menghitung keadaan sistem sebagai serangkaian simulasi kondisi tunak (*steady-state simulations*), di mana

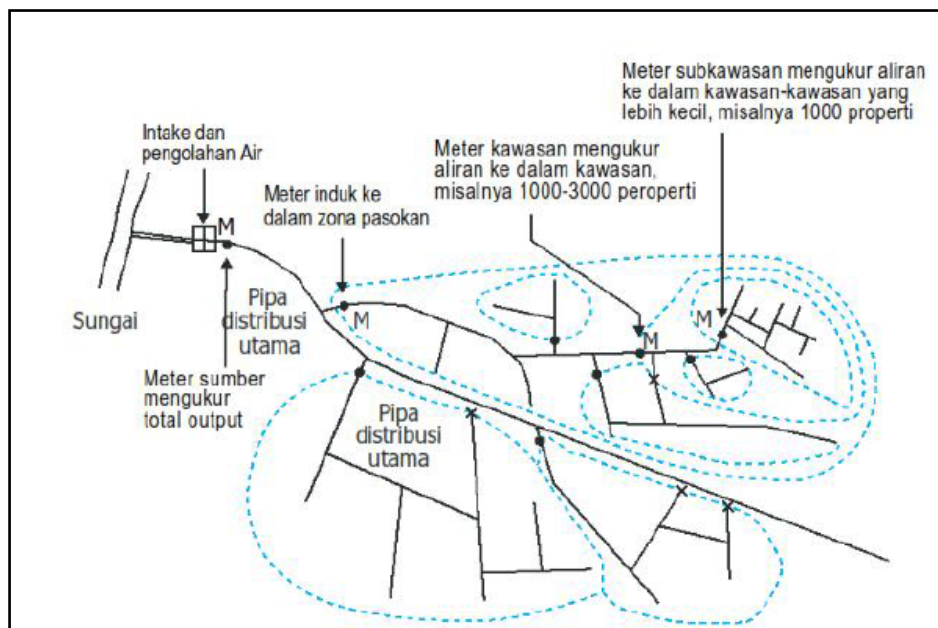
kebutuhan hidraulik dan kondisi jaringan berubah seiring waktu. Model ini memperhitungkan pola waktu pemakaian (*time pattern*), yang membandingkan nilai debit pemakaian per jam dengan nilai debit puncak per hari. Pola ini terdiri dari kumpulan faktor pengali yang dapat diterapkan sebagai kuantitas yang bervariasi sepanjang waktu. Interval waktu yang digunakan dalam pola ini diatur untuk periode 24 jam pengaliran.

2.8 District Meter Area (DMA)

Monitoring secara kontinu sangat diperlukan dalam manajemen kehilangan air, baik yang bersifat fisik maupun non-fisik. Untuk kehilangan air secara fisik, penggunaan perangkat deteksi yang efektif dapat membantu mengidentifikasi area dengan kemungkinan kehilangan air yang lebih tinggi (Özdemir, 2018). Dalam jaringan distribusi SPAM, perlu diterapkan batasan-batasan terukur agar pemantauan dapat dilakukan secara efektif, dan konsep ini disebut sebagai *District Metered Area (DMA)*.

District Metered Area (DMA) adalah metode untuk mengurangi kehilangan air dengan membagi jaringan pasokan air menjadi zona-zona yang terukur. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk mendeteksi kebocoran di bagian tertentu dari sistem distribusi dengan memfokuskan pemantauan pada wilayah deteksi kebocoran yang spesifik (Farley et al., 2008). Dengan kata lain, suatu area dalam jaringan distribusi diisolasi untuk mengidentifikasi potensi kebocoran di wilayah tersebut (Yekti et al., 2020). Pembagian jaringan distribusi menjadi DMA dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.

Kriteria desain DMA harus diperhatikan dengan seksama untuk memastikan sistem yang efektif. Kriteria tersebut meliputi: jumlah sambungan dalam DMA, yang biasanya berkisar antara 1000-2500 sambungan; jumlah katup yang perlu ditutup untuk mengisolasi DMA; jumlah meter air yang diperlukan untuk mengukur aliran masuk dan keluar (semakin sedikit meter yang diperlukan, semakin rendah biaya pembentukannya); serta variasi permukaan tanah yang memengaruhi tekanan di dalam DMA (kawasan yang lebih datar menghasilkan tekanan yang lebih stabil, memudahkan pengendalian tekanan) (Farley et al., 2008).



Gambar 2. 6. Pembagian Jaringan Distribusi ke dalam DMA

Sumber: (Ali, 2010)

2.9 PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang adalah perusahaan daerah yang menyediakan layanan air minum kepada masyarakat. PERUMDA ini bertanggung jawab untuk mengelola dan mendistribusikan air bersih yang memenuhi standar kesehatan kepada masyarakat dengan cara yang merata, tertib, dan teratur.

2.9.1 Sejarah Singkat PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

PDAM Kota Padang Panjang, yang kini dikenal sebagai PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang berdasarkan PP No. 54 Tahun 2017 tentang Badan Usaha Milik Daerah, didirikan melalui Peraturan Daerah (PERDA) Kota Padang Panjang Nomor 03 Tahun 1979 tanggal 18 Januari 1979 dan dicatat dalam Lembaran Daerah Nomor 02 Tahun 1980. Sebelumnya, PDAM merupakan Seksi Air Minum yang berada di bawah koordinasi Bagian Pemerintahan Kantor Walikota Padang Panjang. Pada 17 Mei 1982, PDAM Kota Padang Panjang secara resmi beroperasi sebagai Perusahaan Daerah dengan kekayaan yang dipisahkan. Pada tahun 2002, Pemerintah Kota Padang Panjang mengukuhkan kembali status PDAM sebagai perusahaan milik Pemerintah Kota Padang Panjang dengan menetapkan Perda Nomor 2 Tahun 2002 mengenai Status Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang Panjang, serta beberapa Perda yang mengatur operasional PDAM Kota Padang Panjang. Perda Nomor 3 Tahun 2002 mengatur tentang Pembentukan Organisasi

dan Tata Kerja Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang Panjang, sementara Perda Nomor 4 Tahun 2002 membahas Pokok-Pokok Pengelolaan Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang Panjang. Sebagai langkah selanjutnya dari pelaksanaan Perda tersebut, telah ditetapkan Keputusan Walikota Padang Panjang mengenai PDAM.

1. Keputusan Walikota Nomor 3 Tahun 2002 mengenai Petunjuk Pelaksanaan Peraturan Daerah Kota Padang Panjang Nomor 3 Tahun 2002 tentang Pembentukan Organisasi dan Tata Kerja Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang Panjang.
2. Keputusan Walikota Nomor 4 Tahun 2002 mengenai Petunjuk Pelaksanaan Peraturan Daerah Kota Padang Panjang Nomor 4 Tahun 2002 tentang Pokok-Pokok Pengelolaan Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang Panjang.

Penyelenggaraan pelayanan umum atas pengelolaan air bersih dan air minum untuk masyarakat, yang memenuhi standar kesehatan merupakan kegiatan pokok perusahaan. PDAM Kota Padang Panjang memiliki 7 sumber air aktif dengan kapasitas total sebesar 233,99 liter per detik dan 5 bak penampung (reservoir) dengan kapasitas total 1650 liter per detik. Pelayanan air bersih kepada masyarakat Padang Panjang telah berlangsung sejak tahun 1913, meliputi Bak Intake Kandang di Tabek dan Reservoir Bak di Atas. Peta kondisi eksisting, peta wilayah SPAM, dan skema zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Padang Panjang dapat dilihat pada **Gambar 2.7, Gambar 2.8** dan **2.9**.

2.9.2 Daerah Pelayanan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

Tingkat pelayanan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang adalah 80,72%, dengan jumlah penduduk yang dilayani sebanyak 52.895 jiwa. PERUMDA ini melayani dua wilayah administratif, yaitu:

a. Wilayah Administratif Kota Padang Panjang

Wilayah ini mencakup 2 kecamatan dan 16 kelurahan, dengan jumlah pelanggan aktif mencapai 8.056 sambungan rumah pada tahun 2020;

b. Wilayah Administratif Kabupaten Tanah Datar

Pada tahun 2017, terdapat 483 sambungan rumah sebagai pelanggan aktif di sekitar sumber air Kandang Ditabek, Nagari Paninjauan, Kecamatan X Koto. Pembagian daerah pelayanan didasarkan pada kecamatan atau wilayah yang lebih dekat dengan sumber air baku. Informasi mengenai reservoir pelayanan dan sumber air PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dapat dilihat pada **Tabel 2.3**. Pada **Tabel 2.4** dan

Tabel 2.5 diperlihatkan data jaringan pipa distribusi dan pelanggan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

PDAM Kota Padang Panjang memperoleh sumber air dari air permukaan dan mata air, yaitu:

1. Sumber Kandang Ditabek

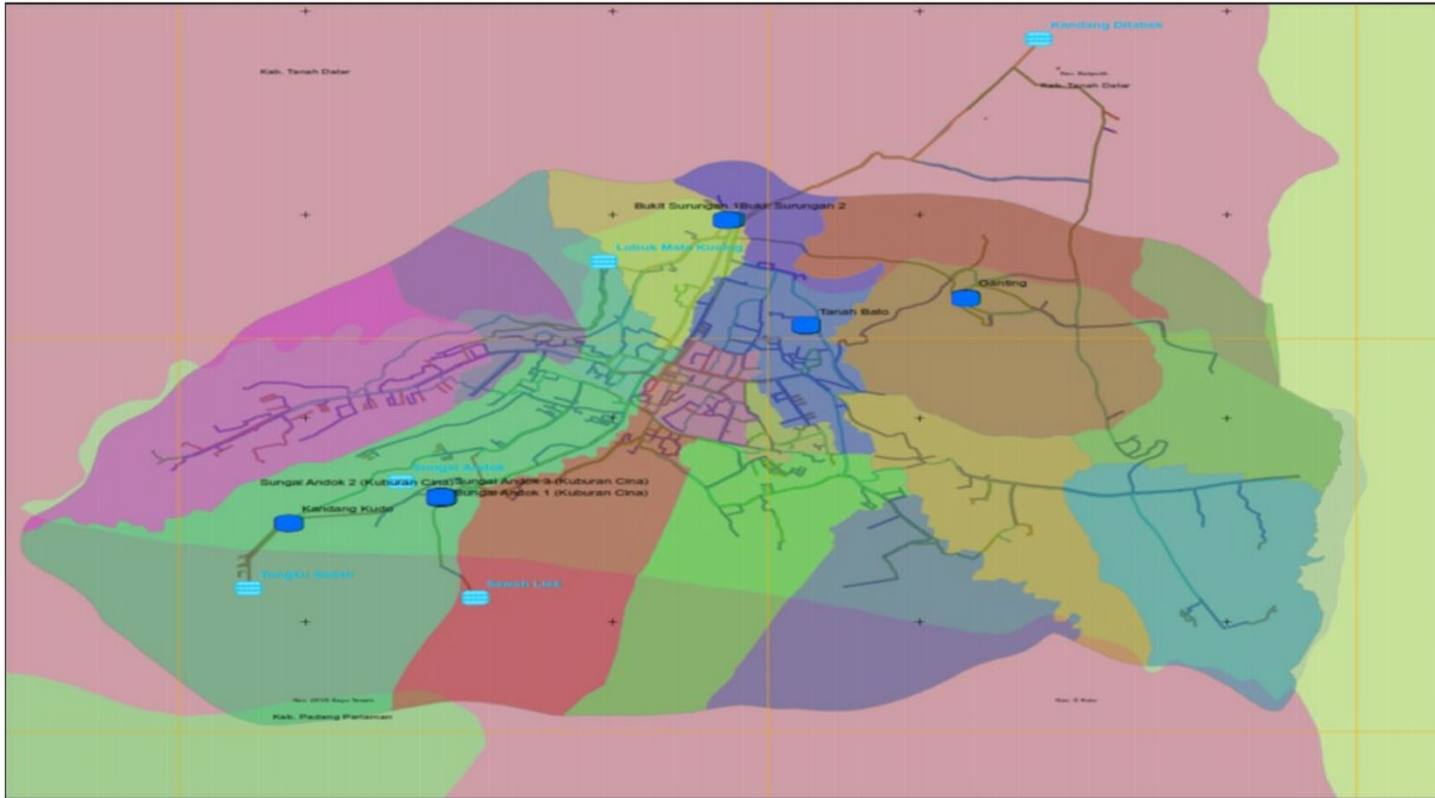
Sumber ini dibangun pada tahun 1913 dengan sistem aliran gravitasi untuk melayani daerah Nagari Paninjauan serta sebagian wilayah Kelurahan Ganting dan Kelurahan Sigando. Sumber ini mengalirkan air melalui pipa transmisi dengan diameter 150 mm dan 100 mm yang dilengkapi dengan Watermeter induk. Debit produksi totalnya berkisar antara 25 hingga 40 liter per detik, dengan kapasitas terpasang 45 liter per detik dan kapasitas produksi maksimal 25 liter per detik.

2. Sumber Air Tungku Sadah

Sumber ini adalah air permukaan yang menggunakan bendungan penangkap. Pada awal pembangunan pada tahun 2000, sumber air ini memiliki kapasitas produksi antara 20 hingga 35 liter per detik. Namun, kapasitas tersebut menurun drastis menjadi hanya 5 liter per detik selama musim kemarau. Intake ini dilengkapi dengan beberapa pipa produksi/transmisi berdiameter 100 mm untuk mendistribusikan air secara gravitasi ke Reservoir Kuburan Cina dan Reservoir Kandang Kudo. Kapasitas terpasang dari intake ini adalah 25 liter per detik, dengan kapasitas produksi mencapai 18 liter per detik.

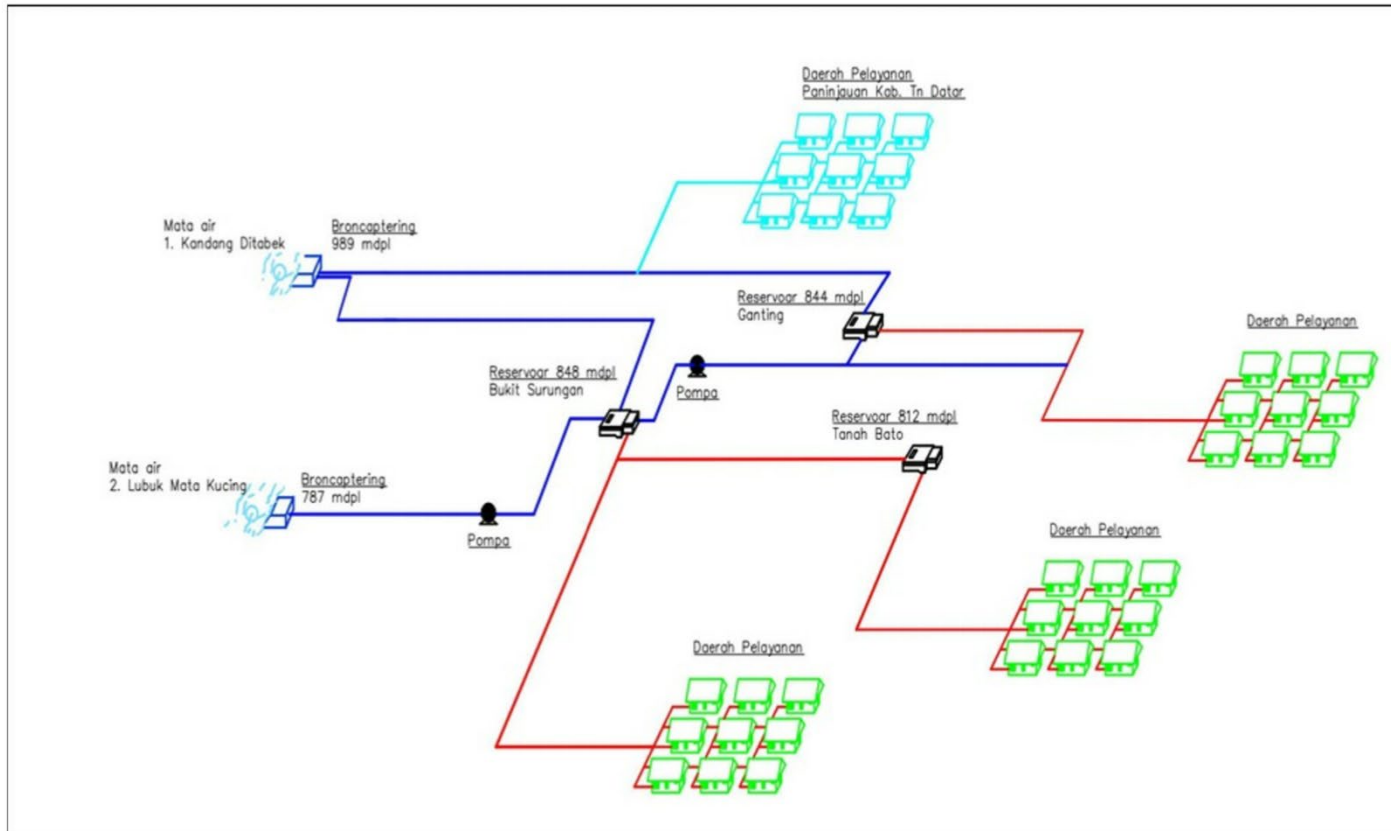
3. Sumber Air Kumayan/ Sawah Liek

Sumber air ini dibangun bersamaan dengan Intake Tungku Sadah pada tahun 2000 dan langsung menyuplai kebutuhan Reservoir Kuburan Cina, menggunakan pipa produksi berdiameter 100 mm. Total produksi dari Sumber Air Sawah Liek ini dapat mencapai 10 liter per detik. Kapasitas produksi bergantung pada kondisi iklim; selama musim kemarau, permukaan air dapat menurun secara signifikan. Sumber ini memiliki kapasitas terpasang 10 liter per detik, dengan kapasitas produksi 8 liter per detik.



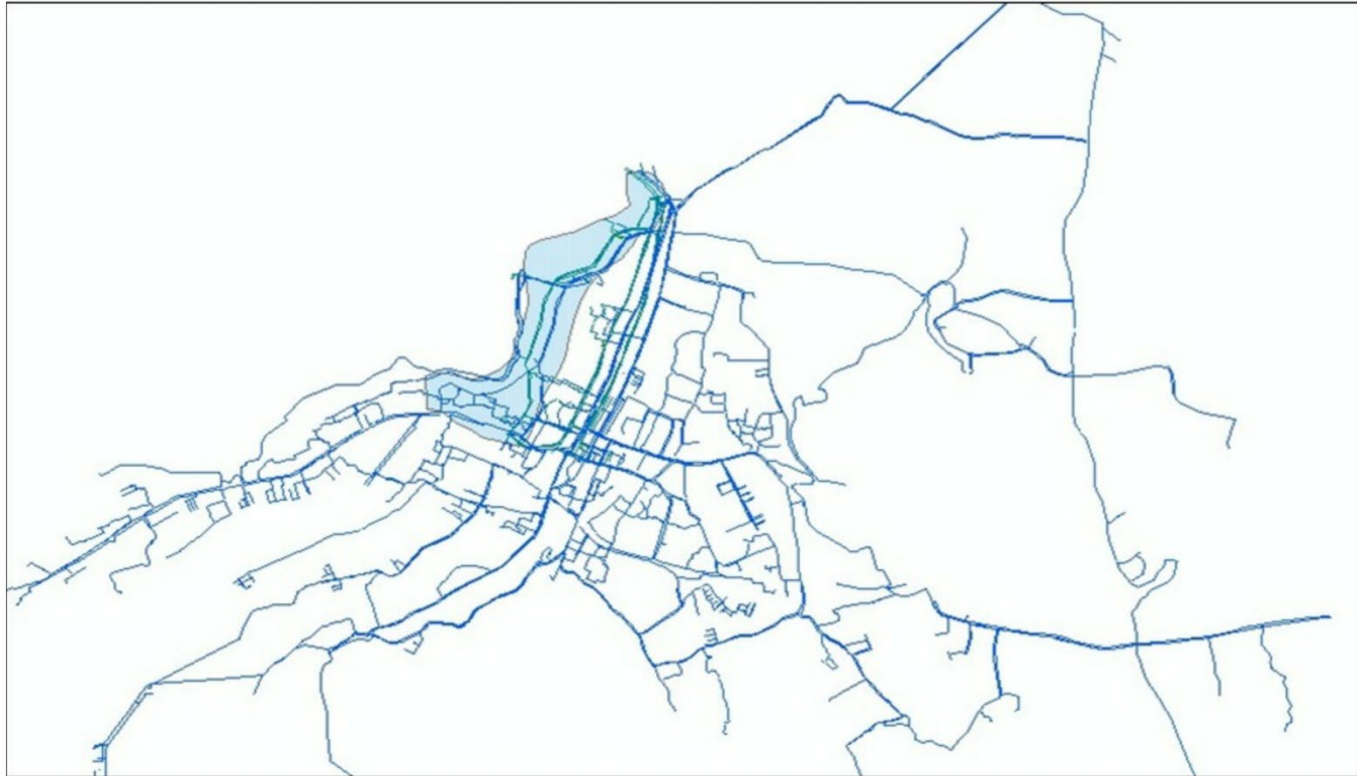
Gambar 2. 7. Peta Wilayah SPAM PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

Sumber: PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021



Gambar 2. 8. Skema Transmisi-Distribusi Zona Bukit Surungan

Sumber: PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021



Gambar 2. 9. Peta Jaringan Distribusi Zona Bukit Surungan

Sumber : PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

Tabel 2. 3. Reservoir Pelayanan PDAM Kota Padang Panjang

No	Sumber Air	Lokasi Sumber	Nama Reservoir	Sistem Pengaliran	Kapasitas terpasang	Tahun Fisik		Wilayah Layanan
					l/dt	Pembangunan	Rehabilitasi	
1	Kandang Di Tabek (Mata Air)	Nagari Paninjauan	Busur dan Ganting	1 Gravitasi	42,00	1903	-	Nagari Paninjauan, Padang Panjang Timur
2	Lubuk Mata Kucing (Mata Air)	Padang Panjang Barat	Bukit Surungan 1	Gravitasi	16,00	1989	2017	Padang Panjang Barat dan Padang Panjang Timur
	Lubuk Mata Kucing (Mata Air)	Padang Panjang Barat	Bukit Surungan 2	Gravitasi	100,00	1989	2017	Padang Panjang Barat
3	Tungku Sadah (Air Permukaan)	Kampung Manggis Padang Panjang Barat	Kandang Kudo > Kuburan Cino Bak 1	Gravitasi	25,00	1997	-	Padang Panjang Barat dan Padang Panjang Timur
4	Sawah Liek. (Air Permukaan)	Koto Panjang Padang Panjang Timur	Kuburan Cino Bak 3	Gravitasi	15,00	2005	-	Padang Panjang Barat dan Padang Panjang Timur
5	Kuok (Paninjauan) (Air Permukaan)	Nagari Paninjauan		Gravitasi	2,99	2013	-	Padang Panjang Timur
6	Koto Katiak (Mata Air)	Koto Katiak Padang Panjang Timur		Gravitasi	3,00	2010	-	Padang Panjang Timur
7	Sungai Andok (Mata Air)	Sungai Andok Padang Panjang Barat	Kuburan Cino Bak 2	Gravitasi	30,00	2015	-	Padang Panjang Barat dan Padang Panjang Timur
TOTAL					233,99			

Sumber: PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

Tabel 2. 4. Data Pipa pada Jaringan Distribusi DMA 1 Dan 2

	Lokasi Jaringan Pipa	Jenis Pipa	D (inch)	Jarak (m)	Pembangunan Pipa	Umur Teknis Pipa
Jalan Soekarno Hatta						
1	Bak Reservoir, Bukit Surungan - Bak BPT, Tanah Bato	HDPE	6"	1300	2016	4 Tahun
2	Bengkel Sei. Talang - Batas Kota - Perumahan Guru Busur	PVC	2"	1.221	2007	13 Tahun
3	Belakang Rumah Wakil Walikota - Jalan Hamid Hakim Depan Rumah Ortu Safwan Hadi	PVC	2"	410	2006	14 Tahun
4	Belakang Pengadilan - Jembes	PVC	2"	254	1995	25 Tahun
5	Simpang Bak Aie Bukit Surungan - Jalan Soekarno Hatta - Mesjid Jihadu	PVC GI	3" 2"	802 410	1990	30 Tahun
6	Reservoir Bukit Surungan - Depan PDAM	PVC	3"	1.385	1990	30 Tahun
7	Jalan Soekarno Hatta (Gang Kamboja - SD Busur) dan Gang Ester - Mesjid Dekat Rumah dr. Zulfa	PVC GI	2" 1"	325 168	1990	30 Tahun
8	Reservoir Busur - Depan PDAM	DCIP	6"	1.665	1973	47 Tahun
9	Reservoir Busur - Simpang Pasific Bukit Surungan	PVC	6"	204	1973	47 Tahun
Jalan Prof Dr Hamka						
1	Perumahan Belakang AKPER NABILA Terminal Busur	HDPE	1"	250	2018	2 Tahun
2	Reservoir 3 Busur Jl. Prof. DR. Hamka - Jl. El Yunusiah depan SD 01 Paus	HDPE	6"	1.700	2018	2 Tahun
3	Depan Puskesmas Busur	PVC	2"	100	2015	5 Tahun
4	Pasar Sayur Bukit Surungan	PVC	2"	210	2006	14 Tahun
5	Simpang Terminal Busur - Simpang Lubuk Mata Kucing	PVC	2"	540	2000	20 Tahun
6	Depan Pesona Penganten - Simpang Lubuk Mata Kucing	PVC	3"	264	1994	26 Tahun
7	Jalan Soekarno Hatta - Depan Pesona Penganten	PVC	3"	800	1993	27 Tahun
Jalan R. El Yunusiah, Jalan Hamid Hakim, Jalan Syech M. Rasyidi (Suka Maju)						
1	Belakang SD 01 Pasar Usang - Suka Maju	PVC	2"	335	2011	9 Tahun

	Lokasi Jaringan Pipa	Jenis Pipa	D (inch)	Jarak (m)	Pembangunan Pipa	Umur Teknis Pipa
2	Depan PDAM - Depan Rumah Safwan Hadi Pasar Usang	PVC	2"	622	2011	9 Tahun
3	Simpang Padang - Simpang Suka Maju	PVC	3"	376	2009	11 Tahun
4	Simpang Thawalib Putra - BKD	PVC	3"	506	2005	15 Tahun
5	Kampung Baru - Brimob Silaing Atas	PVC	2"	524	1995	25 Tahun
6	Gang Sempit Pasar Usang	PVC	3"	150	1995	25 Tahun
7	Simpang Lubuk Mata Kucing - Simpang Kampung Baru Suka Maju	PVC	2"	600	1994	26 Tahun
8	Belakang Rumah Sekda Suka Maju	GI	2"	436	1990	30 Tahun
9	Depan PLN Lama - Depan Gerbang Mesjid Jembes -Simpang Gang Sempit (Jl. R. EL Yunusiah)	GI	2"	77	1976	44 Tahun
		GI	1"	114	1976	44 Tahun
10	Simp. Lb. Mata Kucing - Depan Rumah Ortu Wan PDAM	PVC	3"	64	1976	44 Tahun
11	Rumah Camat X Koto - Terminal Pasar Usang	GI	3"	200	1976	44 Tahun
12	Depan PDAM - Jl. R. El Yunusiah - BKD - Gatangan	DCIP	8"	600	1973	47 Tahun

Sumber: PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

Tabel 2. 5. Jumlah Pelanggan Masing-masing Zona Pelayanan

No.	Wilayah Pelayanan	Pelanggan (SR)	Rata Rata Konsumsi (m ³ /hari)
1.	Zonasi Silaing Bawah	663	912
2.	Zona Bukit Surungan	3,609	7,739
3.	Zona Sawah Like	1,808	1,164
4.	Zona Tungku Sadah	1,502	3,192
5.	Zona Sungai Andok	1,601	524
Total		9,183	13,532

Sumber: Perumda Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

4. Sumber Air Pompa Sungai Andok

Pembangunan ini dilaksanakan pada tahun 2015 dengan dana dari DAK yang bersumber dari APBN sebesar 1,8 miliar. Proyek ini mencakup pembangunan rumah jaga, rumah pompa, pipa produksi, dan pompa berkapasitas 35 KW. Mata air ini dirancang untuk menyuplai air ke Reservoir Kuburan Cina dengan pompa produksi yang memiliki

kapasitas 30 liter per detik. Pipa intake yang menghubungkan mata air ke reservoir memiliki panjang sekitar 300 meter dengan diameter 250 mm.

2.9.4 Sistem Pengolahan

PDAM Kota Padang Panjang mengelola 7 unit produksi. Proses pengolahan air yang dilakukan oleh PDAM Kota Padang Panjang hanya mencakup disinfeksi, tanpa pengolahan lengkap. Instalasi pengolahan air di PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dan jenis pengolahan yang diterapkan di masing-masing unit dapat dilihat pada **Tabel 2.6** dan **Tabel 2.7**.

Tabel 2. 6. Unit IPA PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

No	Nama Unit IPA	Lokasi Sumber	Jenis Sumber	Pengolahan	Sistem Pengaliran
1.	Kandang Ditabek	Paninjauan	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi
2	Lubuk Mata Kucing	Lubuk Mata Kucing	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi, Pompa
3	Tungku Sadah	Sei Andok	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
4	Sawah Like	Sei Andok	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
5	Kuok (Paninjauan)	-	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
6	Koto Katiak	-	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi
7	Sungai Andok	-	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi, Pompa

Sumber: Perumda Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

Tabel 2. 7. Unit IPA PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang

No	Nama Unit IPA	Lokasi Sumber	Jenis Sumber	Pengolahan	Sistem Pengaliran
1.	Kandang Ditabek	Paninjauan	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi
2	Lubuk Mata Kucing	Lubuk Mata Kucing	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi, Pompa
3	Tungku Sadah	Sei Andok	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
4	Sawah Like	Sei Andok	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
5	Kuok (Paninjauan)	-	Air Permukaan	Tidak Lengkap	Gravitasi
6	Koto Katiak	-	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi
7	Sungai Andok	-	Mata Air	Tidak Lengkap	Gravitasi, Pompa

Sumber: Perumda Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

2.9.5 Kualitas Air

Kualitas air produksi dari PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, khususnya di wilayah layanan zona Bukit Surungan, dibandingkan dengan standar baku mutu yang ditetapkan dalam PERMENKES No. 492 Tahun 2010 dan Peraturan Menteri Kesehatan RI

No. 736 Tahun 2010 tentang Tata Laksana Pengawasan Kualitas Air Minum, dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.

Sumber air baku untuk Zona Bukit Surungan yang digunakan oleh PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang berasal dari mata air Kandang Ditabek. Reservoir di zona Bukit Surungan tidak melalui proses pengolahan lain selain desinfeksi. Desinfektan yang digunakan adalah kaporit dengan dosis 0,5-1,0 mg/L dan waktu kontak selama 30 menit. Pengukuran menunjukkan bahwa parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi dari sampel air Reservoir Bukit Surungan sudah memenuhi standar kualitas air minum.

Tabel 2. 8. Karakteristik Air Reservoir Bukit Surungan

No	Parameter	Satuan	Pengukuran	Baku Mutu*
Mikrobiologi				
1	<i>Escherichia coli</i>	Per 100 ml sampel	0	0
2	<i>Total Coliform</i>	Per 100 ml sampel	0	0
Fisika				
1	Bau		Tidak berbau	Tidak berbau
2	Rasa		Tidak berasa	Tidak berasa
3	Warna	TCU	2,5	15
4	Total zat padat terlarut (TDS)	mg/L	194	500
5	Kekeruhan	NTU	-	5
6	Suhu	°C	23	Suhu udara ± 3
Kimia				
1	Nitrit (Sebagai NO ₂)	mg/L	-	1
2	Besi	mg/L	0,02	1
3	Kesadahan	mg/L	160	500
4	Mangan	mg/L	0,01	0,5
5	Ph	mg/L	7,1	6,5 - 8,5
6	Sulfat	mg/L	-	400
7	Zat Organik (KMnO ₄)	mg/L	0,32	10
8	Sisa klor	mg/L	0,25	0,2-1**

Sumber: PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang, 2021

Keterangan:

*) Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum

***) Peraturan Menteri Kesehatan No. 736 Tahun 2010 tentang Tata Laksana Pengawasan Air Minum

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Bab metodologi penelitian ini menguraikan riset yang dilakukan di Perusahaan Umum Daerah (PERUMDA) Air minum Kota Padang Panjang pada jaringan distribusi Distrik Meter Area (DMA) 1 dan 2 Zona Bukit Surungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi sisa klor pada jaringan DMA 1 dan 2 Bukit Surungan dengan aplikasi Epanet 2.2, serta membandingkan distribusi klor dan tekanan antara hasil pengujian lapangan dengan simulasi Epanet 2.2 melalui uji *Root Mean Square Error* (RMSE). Selain itu, penelitian ini juga menganalisis hubungan antara pH, jarak, tekanan, suhu dan keberadaan *Escherichia coli* terhadap sisa klor menggunakan analisis regresi dan korelasi.

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

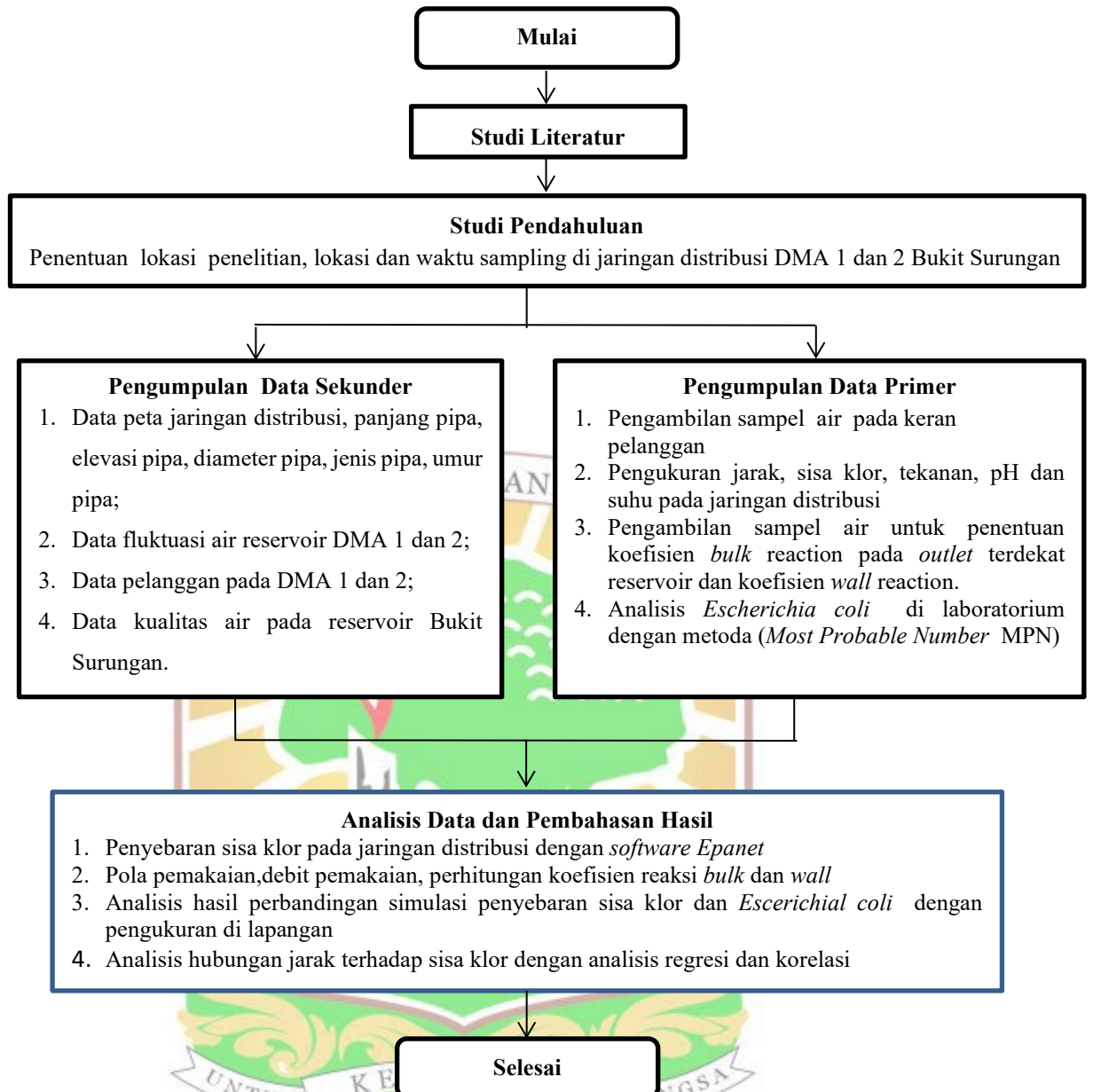
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni Tahun 2021. Sampel diambil selama tujuh kali dengan waktu yang terdapat **Tabel 3.1**. Lokasi penelitian mencakup reservoir dan jaringan distribusi *District Meter Area* (DMA) 1 dan 2 zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang. Parameter *Escherichia coli* dilakukan pengujian di Laboratorium Mikrobiologi Teknik Lingkungan Universitas Andalas Padang.

Tabel 3. 1. Waktu Penelitian

No	Sampling	Hari/Tanggal
1	Hari pertama	Rabu/ 02 Juni 2021
2	Hari ke-II	Jum'at/ 04 Juni 2021
3	Hari ke-III	Senin/ 07 Juni 2021
4	Hari ke-IV	Kamis/ 10 Juni 2021
5	Hari ke-V	Selasa/15 Juni 2021
6	Hari ke-VI	Sabtu/ 19 Juni 2021
7	Hari ke-VII	Minggu/ 20 Juni 2021

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan. Tahap pertama yaitu dengan mencari studi literatur, kemudian melakukan studi pendahuluan. Selanjutnya melakukan pengumpulan data sekunder dan data primer berupa analisis suhu, pH, tekanan, sisa klor di lapangan dan parameter *E.coli* di laboratorium. Tahap akhir yaitu dilakukan analisis data dan pembahasan. Metodologi penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir **Gambar 3.1**



Gambar 3. 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian.

3.3.1 Studi Literatur

Tahapan studi literatur terdiri dari pengumpulan dan pembahasan dari literatur yang relevan dengan kerangka masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup serta metode penelitian. Penelitian sebelumnya juga ditambahkan sebagai referensi dalam studi literatur.

3.3.2 Studi Pendahuluan

Studi pendahuluan dibutuhkan untuk mengidentifikasi informasi yaitu:

1. Lokasi penelitian

Lokasi penelitian terletak di wilayah DMA 1 dan 2 Zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dapat dilihat pada **Gambar 3.2** dan **Gambar 3.3**.

2. Lokasi *sampling*

Penetapan titik-titik *sampling* dilakukan untuk lokasi pengambilan sampel air serta pengukuran parameter yaitu sisa klor, tekanan, suhu, serta pH pada jaringan distribusi Air Minum. Untuk mewakili jaringan distribusi utama, maka sampel Sampel diambil dari keran pelanggan dengan titik terjauh. Lokasi *Sampling* ditunjukkan pada **Gambar 3.2**, **Gambar 3.3** dan **Tabel 3.2**.

3. Waktu *sampling*

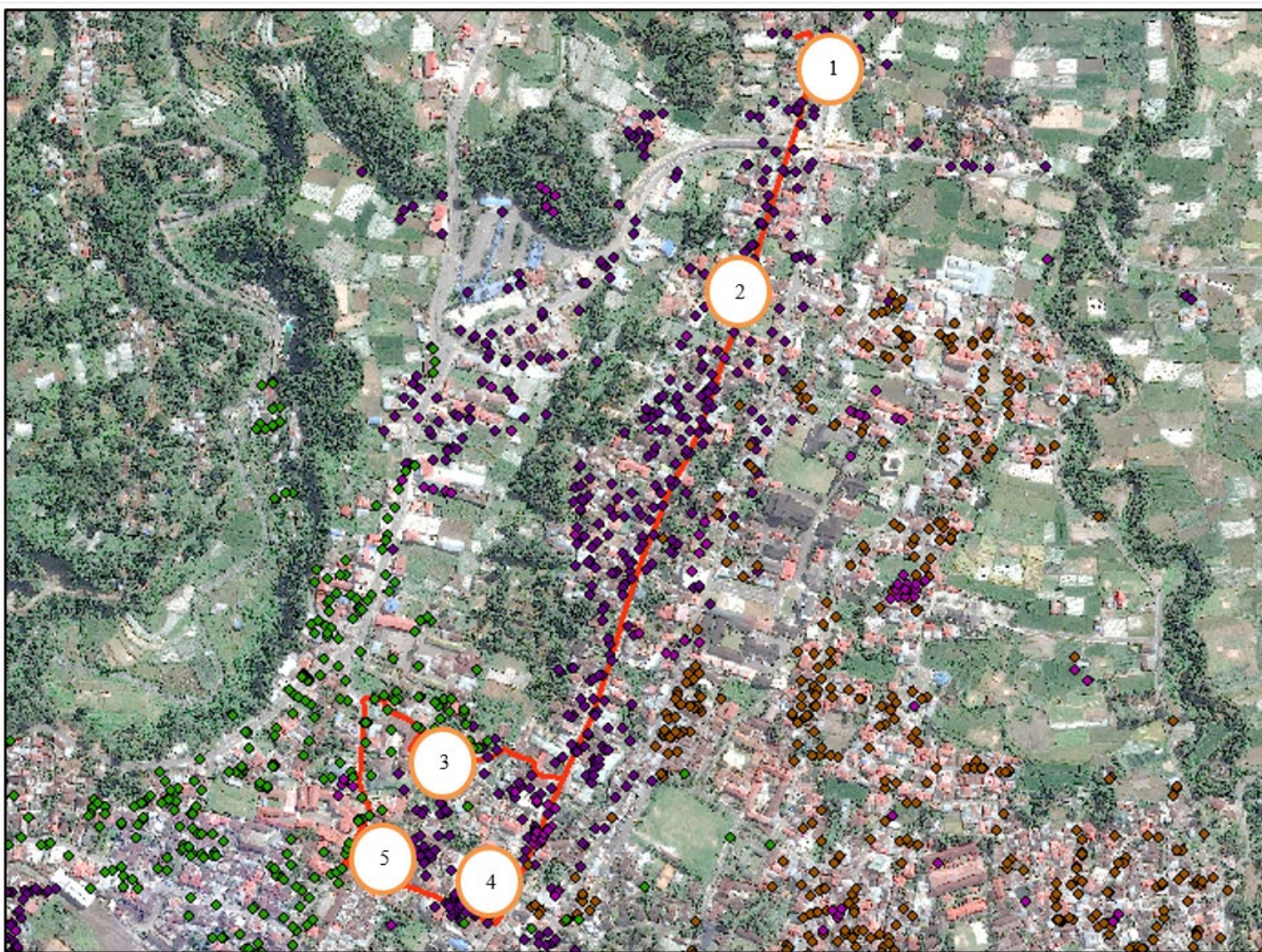
Waktu pengambilan sampel ditentukan berdasarkan survei terhadap data fluktuasi penggunaan air dari PERUMDA pada beberapa hari sebelum pengambilan sampel. *Sampling* dilakukan pada jam puncak pemakaian air yaitu jam 07.00-08.00 WIB.

3.3.3 Pengumpulan Data Sekunder

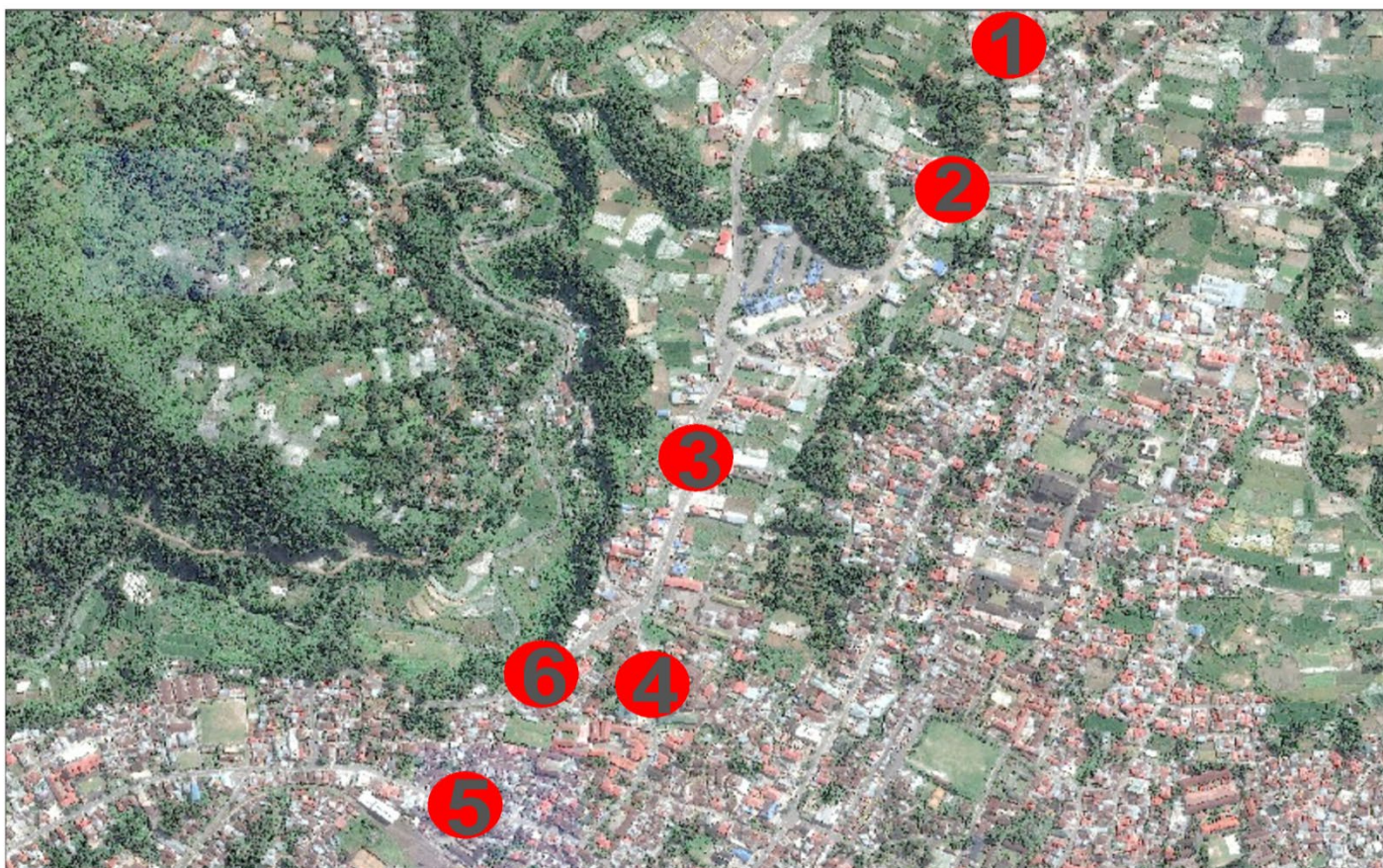
Data sekunder adalah data yang didapatkan sebagai data pendukung penelitian. Data sekunder yang dikumpulkan berasal dari PERUMDA air Minum Kota Padang Panjang. Data yang dikumpulkan meliputi data pelanggan, data kondisi jaringan distribusi, data fluktuasi penggunaan air reservoir, dan data kualitas air reservoir.

3.3.3.1 Jaringan Distribusi

Data jaringan distribusi terdiri dari peta jaringan dan data pipa. Peta jaringan distribusi berfungsi untuk memahami jalur distribusi air dan menunjukkan posisi serta lokasi dari pipa pada jaringan distribusi PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang. Informasi yang dikumpulkan pada jaringan distribusi meliputi data panjang pipa, jenis pipa, elevasi pipa, diameter pipa dan umur pipa. Data ini digunakan untuk melakukan simulasi hidrolis perpipaan dan mengoperasikan *Epanet* dalam menentukan sisa klor dan tekanan.



Gambar 3. 2. Kawasan Penelitian DMA 1 Zona Bukit Surungan



Gambar 3. 3. Lokasi Pengambilan Sampel pada DMA 2 Zona Bukit Surungan

Tabel 3. 2. Lokasi Sampling

DMA	No.	Lokasi	Koordinat	Jarak (m)	Keterangan
DMA 1	1.	Reservoir Bukit Surungan	-0,4515016,	-	Lokasi awal pembubuhan
	2.	Jalan Soekarno Hatta	-0,4525459,	320	Titik terdekat reservoir
	3.	Jalan Rahmah Elyunusiah	-0,4627820,	1.300	Jaringan utama titik
	4.	Jalan Prof. M. Yamin	-0,4637804,	1.500	Jaringan utama
	5.	Jalan Hamid Hakim	-0,4619462,	1.560	Titik terjauh
DMA 2	1.	Reservoir Bukit Surungan	-0,4515016,	-	Lokasi awal pembubuhan
	2.	Jl. Soekarno Hatta	-0,4540010,	1.418	Titik terdekat dari reservoir
	3.	Jl. Prof Hamka	-0,4563811,	3.528	Jaringan utama
	4.	Jl.Hamid Hakim	-0,4630492,	4.924	Jaringan utama
	5.	Jl.Muhammad Yamin	-0,4637147,	5.423	Jaringan utama
	6.	Jl Syech M Daud Rasidi	-0,4614037,	6.836	Titik terjauh dari reservoir

3.3.3.2 Pengamatan Fluktuasi Air pada Reservoir

Nilai fluktuasi air yang digunakan berasal dari data fluktuasi selama 24 jam dalam waktu 7 kali pengambilan sampel pada bulan Juni 2021. Data fluktuasi diperoleh dari bagian produksi PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dan digunakan untuk menentukan jam pemakaian maksimum dan minimum serta waktu pengambilan sampel air. Selain itu, nilai fluktuasi juga dapat menentukan pola waktu (*time pattern*) yang merupakan kumpulan pengali (*multiplier*) pada debit yang memungkinkan variasi sepanjang waktu dalam simulasi *Epanet*. Pola waktu ditentukan dari perbandingan nilai fluktuasi debit per waktu (L/detik) dengan nilai rata-rata debit fluktuasi harian (L/detik). Data fluktuasi diperoleh melalui pengukuran menggunakan *flow meter* yang terpasang pada reservoir. Pemantauan nilai fluktuasi dilakukan dalam waktu 24 jam menggunakan kamera monitor yang nilainya langsung tercatat dalam sistem pendataan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

3.3.3.3 Data Pemakaian Pelanggan

Data pemakaian pelanggan adalah informasi terkait air yang digunakan oleh pelanggan dalam jangka waktu tertentu. Data jumlah pelanggan dan hasil pencatatan meteran air pelanggan setiap bulannya merupakan acuan untuk memperoleh data jumlah debit yang dikonsumsi. Data pelanggan DMA 1 dan 2 Bukit Surungan yang diambil adalah data pada bulan Juni. Penentuan pelanggan dilihat dari batasan cakupan pelayanan pada peta persebaran pelanggan yang

diperoleh dari pihak PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

3.3.3.4 Data Kualitas Air Reservoir Bukit Surungan

Data kualitas air pada reservoir Zona Bukit Surungan adalah hasil dari pengujian yang dilakukan pada Bulan Juni Tahun 2021 dari Bagian Produksi PERUMDA Air Minum Padang Panjang. Kualitas air reservoir yang dianalisis meliputi Besi (Fe), Mangan (Mn), dan Sulfat yang dapat memengaruhi kadar sisa klor.

3.3.4 Pengambilan Sampel Air

Sampling air dilakukan pada keran pelanggan dengan titik terdekat dari jaringan utama distribusi. Proses ini menggunakan pendekatan *cross-sectional* di mana sampel diambil pada titik yang sama dalam waktu tertentu. Jam puncak pemakaian air yaitu pada jam 07.00-08.00 WIB merupakan waktu pengambilan sampel air. *Sampling* dilaksanakan selama tujuh kali dalam enam lokasi dengan satu sampel pada setiap tempat per harinya. Langkah pertama yaitu melakukan pembersihan, desinfeksi dan pembilasan pada keran air, lalu keran harus dibiarkan mengalir dengan aliran konstan selama pengambilan sampel air (Badan Standarisasi Nasional, 2012). Sampel air dimasukkan ke dalam botol sampel 100 ml untuk analisis di laboratorium untuk parameter *E. coli*. Pengambilan sampel air dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.

3.3.5 Analisis Kualitas Air

Sampel air yang diambil dari keran pelanggan selanjutnya dianalisis kandungan klor, pH dan temperaturnya. Sampel air sebanyak 10 ml dimasukkan ke dalam botol dan diisi dengan indikator *chlorine free* DPD, dihomogenkan untuk diukur sisa klornya (**Gambar 3.5**). Botol sampel yang berisi larutan ini dimasukkan ke dalam alat *Chlorine Meter Lutron CL-2006* (**Gambar 3.6**), selanjutnya tombol *test/call* diklik dan ditunggu hingga muncul nilai sisa klor pada layar alat klorin meter. pH air diukur dengan alat *Portable Lutron PH-201* dengan kisaran antara 0 hingga 50° C. pH meter Lutron PH-201 dilengkapi dengan *probe* alat sampel dan sebuah layar LCD digital yang dapat menyajikan hasil pengoperasian. Mekanisme alat ini yaitu dengan cara mencelupkan *probe* alat ke dalam sampel. Nilai pH sampel ditampilkan pada layar alat seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.7**. Suhu air diukur menggunakan termometer raksa *Lotus* dengan tingkat pengukuran

0°C - 100°C dengan resolusi 1°C. Pengukuran dilakukan dengan cara mencelupkan thermometer ini ke dalam sampel air, kemudian angka yang tertera pada alat merupakan suhu air (**Gambar 3.8**).



Gambar 3. 4. Sampling Air untuk Pengujian *E. coli*



**Gambar 3. 5. Penambahan Indikator
*Chlorine Free DPD***



Gambar 3. 6. Pengamatan Sisa Klor



Gambar 3. 7. Pengukuran Suhu



Gambar 3. 8. Pengukuran pH

Pengujian *E. coli* dilakukan di laboratorium menggunakan Metode *Most Probable Number* (MPN) yang mengacu pada “*BAM Chapter 4: Enumeration of Escherichia coli and Coliform Bacteria*” dan “*BAM Appendix 2: Most Probable Number from Serial Dilutions*” oleh *Food and Drug Administration (FDA) United State of America Government*. Pengujian ini dilakukan dengan menginokulasikan sampel ke tabung berisi medium cair dengan 3 seri pengenceran. Jumlah mikroorganisme yang diperoleh dalam nilai MPN/Volume sampel. Metode MPN dilakukan melalui tiga tahapan yaitu uji pendugaan, uji kepastian/penegasan, dan uji lengkap.

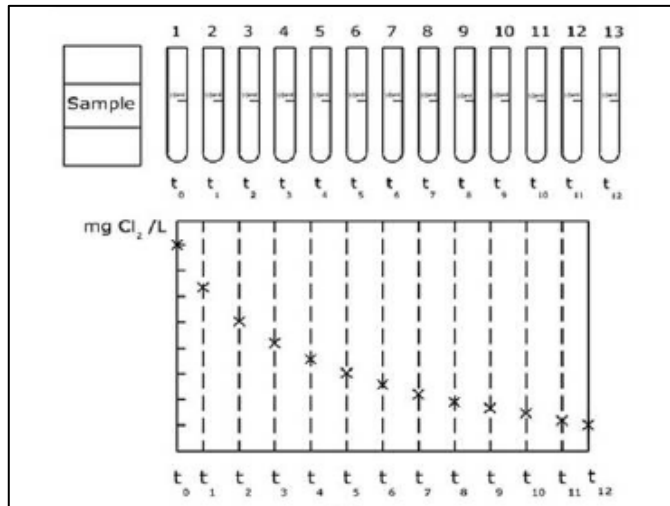
3.3.6 Pengujian Tekanan Pipa

Pengujian tekanan pipa menggunakan alat manometer dengan menghubungkan alat ini ke keran air pelanggan. Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan mengukur sisa klor, suhu, pH di lapangan. Lokasi pengujian berada pada titik terdekat dari jaringan utama distribusi. Pemakaian alat dilakukan dengan melepaskan keran pelanggan dan memasang manometer pada pipa dengan bantuan dari petugas PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang. Setelah dilakukan pemasangan selanjutnya panel jarum analog pada manometer akan menunjukkan nilai tekanan. Pemasangan alat manometer yang digunakan dan pengamatan manometer dapat dilihat pada **Gambar 3.9** dan **Gambar 3.10**.

3.3.7 Pengujian Sisa Klor untuk Penentuan Koefisien *Bulk* dan Koefisien

Wall

Sampel air untuk pengujian sisa klor diambil di pipa terdekat dari outlet reservoir. Kadar sisa klor diamati setiap 10 menit dalam rentang waktu 1 jam (**Gambar 3.11**).



Gambar 3. 9. Diagram Penurunan Konsentrasi Klor

Pengamatan penurunan sisa klor terhadap waktu tersebut digunakan untuk menghitung koefisien *bulk*. Koefisien *wall* didapatkan dari nilai koefisien *bulk* yang selanjutnya dimasukkan ke dalam *software Epanet*. Nilai Koefisien *bulk* dihitung melalui **Persamaan 3.1**.

$$C = C_0 \exp (-K_b.t) \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan :

- C = Konsentrasi klor pada jarak tertentu (mg/L)
- C_0 = Konsentrasi klor pada $t = 0$ (mg/L)
- K_b = Konstanta penurunan
- t = Waktu (jam)

Perhitungan nilai koefisien *wall* dilakukan menggunakan analisis *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai koefisien *wall* dimasukkan ke dalam *software Epanet* melalui metode *trial and error*, jika nilai yang dihasilkan mendekati nol, maka nilai itu yang digunakan. Nilai RMSE yang semakin kecil mengindikasikan variasi nilai yang dihasilkan oleh suatu model perkiraan mendekati variasi nilai observasinya.

3.3.8 Analisis Data

Distribusi PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dilakukan dengan menggunakan *software Epanet 2.2*. Hubungan sisa klor terhadap *E. coli* serta suhu, pH dan tekanan terhadap penyebaran sisa klor dan pada jaringan distribusi PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang dilakukan analisis statistik.



Gambar 3. 10. Pemasangan Alat Manometer



Gambar 3. 11. Pengukuran Manometer

3.3.8.1 Simulasi Hidrolis Jaringan Distribusi

Software Epanet 2.2 digunakan untuk mensimulasikan jaringan distribusi dengan cara menggambar ulang pada peta jaringan *software Epanet 2.2*. Input yang sesuai dengan model eksisting dan data sekunder yang telah dikumpulkan. Reservoir, pipa dan node (titik koneksi pipa) digambarkan dengan input data meliputi koefisien kekasaran pipa, diameter pipa, panjang pipa, elevasi, debit pemakaian air dan pola pemakaian air pada setiap node. Data debit puncak (Q_p) pemakaian air oleh pelanggan per node adalah data yang digunakan pada simulasi ini. Data debit ini akan ditampilkan dalam bentuk pola waktu konsumsi (time pattern) sehingga terjadi variasi debit untuk setiap waktu.

3.3.8.2 Pola Pemakaian Air

Data pola pemakaian air DMA 2 Bukit Surungan berasal dari laporan pengukuran 24 jam pada reservoir. Data ini merupakan informasi terkait dengan pemakaian air selama 24 jam baik saat jam puncak dan jam minimum. Faktor jam puncak merupakan perbandingan nilai debit puncak dengan nilai debit pemakaian rata-rata harian berdasarkan **persamaan 3.2**. Pola pemakaian air merupakan perbandingan nilai debit pemakaian perjam dengan nilai debit rata-rata harian berdasarkan **persamaan 3.3**. Tujuan dari perhitungan nilai pola pemakaian air yaitu untuk simulasi berdasarkan waktu (*extended period simulation*) yang akan diinputkan melalui *pattern editor* pada *software Epanet 2.2*.

$$F_p = Q_{\text{puncak}} / Q_{\text{rata-rata harian}} \dots\dots\dots (3.2).$$

$$\text{Pola Pemakaian} = Q / Q_{\text{rata-rata harian}} \dots \dots \dots (3.3).$$

3.3.8.3 Debit Pemakaian Air (*Base Demand*)

Debit pemakaian air pada setiap node dihitung dari pemakaian pelanggan air dalam waktu satu bulan yang telah didapatkan dari data sekunder. Setelah memperoleh debit pemakaian selama satu bulan, debit rata-rata (Q_r) untuk setiap node dihitung, didapatkanlah debit rata-rata untuk menghitung debit puncak (Q_p) yang merupakan hasil kali debit aliran air pemakaian rata-rata dengan perkalian faktor jam puncak seperti **Persamaan 3.4**. Data debit puncak kemudian dimasukkan pada node pelanggan yang telah ditentukan dalam *software Epanet 2.2*.

$$Q_{\text{puncak}} = Q_{\text{rata-rata}} \times F_{\text{puncak}} \dots \dots \dots (3.4).$$

3.3.8.4 Perbandingan Sisa Klor dan Tekanan Simulasi dengan Pengukuran Lapangan

Sisa klor dan tekanan dari hasil pengukuran di lapangan dianalisis menggunakan *software Epanet* dengan uji *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE diperoleh dari rata-rata dari kuadrat kesalahan yang menunjukkan besar ukuran kesalahan dari suatu model. Semakin kecil nilai RMSE (mendekati 0) maka semakin akurat model tersebut.

3.3.8.5 Hubungan Jarak, suhu, pH, tekanan dan *Escherichia coli* terhadap Kadar Sisa Klor

Variabel penelitian terdiri dari variabel dependen dan independen. Variabel dependen atau terikat yang dipengaruhi, merupakan kadar sisa klor di masing-masing lokasi penelitian. Sedangkan variabel independen atau variabel bebas atau yang mempengaruhi kadar sisa klor di jaringan distribusi. Uji normalitas data dilakukan menggunakan *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). Data yang terdistribusi normal menggunakan nilai signifikansi besar dari 0,05. Uji normalitas yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Shapiro-wilk* dikarenakan jumlah sampel kurang dari 50.

Analisis regresi merupakan analisis statistik yang dilakukan untuk menentukan seberapa besar implikasi jarak, suhu, pH tekanan dan *Escherichia coli* pada kadar sisa klor. Sedangkan untuk mengetahui tingkat hubungan/keeratan parameter

dilakukan dengan pengujian korelasi. Pada penelitian ini analisis korelasi yang digunakan yaitu korelasi *Pearson* untuk data yang terdistribusi normal dan korelasi *Rank Spearman* untuk data yang tidak terdistribusi normal. Koefisien korelasi menunjukkan adanya korelasi antara dua variabel. Apabila korelasi sama dengan 0, antara kedua variabel tidak terdapat hubungan sama sekali. Tanda (+) atau (-) melambangkan arah hubungan antara kedua variabel (Sujarweni, 2014). Nilai r yang diperoleh ini selanjutnya akan diinterpretasikan. Interpretasi nilai r dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3. Interpretasi Nilai r

Besar nilai r	Interpretasi
Antara 0,800 sampai dengan 1,000	Sangat Kuat
Antara 0,600 sampai dengan 0,800	Kuat
Antara 0,400 sampai dengan 0,600	Lemah
Antara 0,200 sampai dengan 0,400	Sangat Lemah
Antara 0,000 sampai dengan 0,200	Tak Berkorelasi



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Bab ini menyajikan hasil dan pembahasan meliputi analisis penyebaran sisa klor di jaringan distribusi, perbandingan kadar sisa klor dan tekanan hasil pengukuran di lapangan dengan hasil simulasi Epanet 2.2. Selain itu juga dilakukan analisis korelasi antara suhu, pH, tekanan, jarak, dan *E. coli* terhadap sisa klor di jaringan distribusi DMA 1 dan 2 di zona Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang.

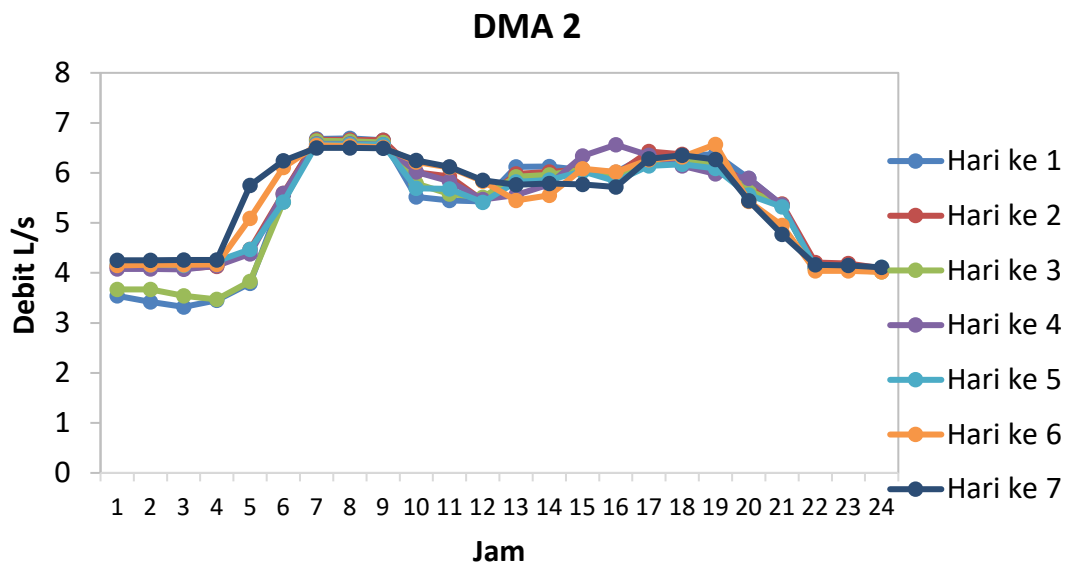
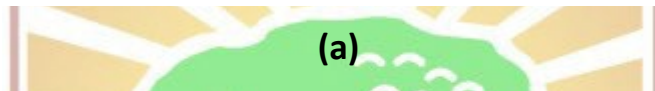
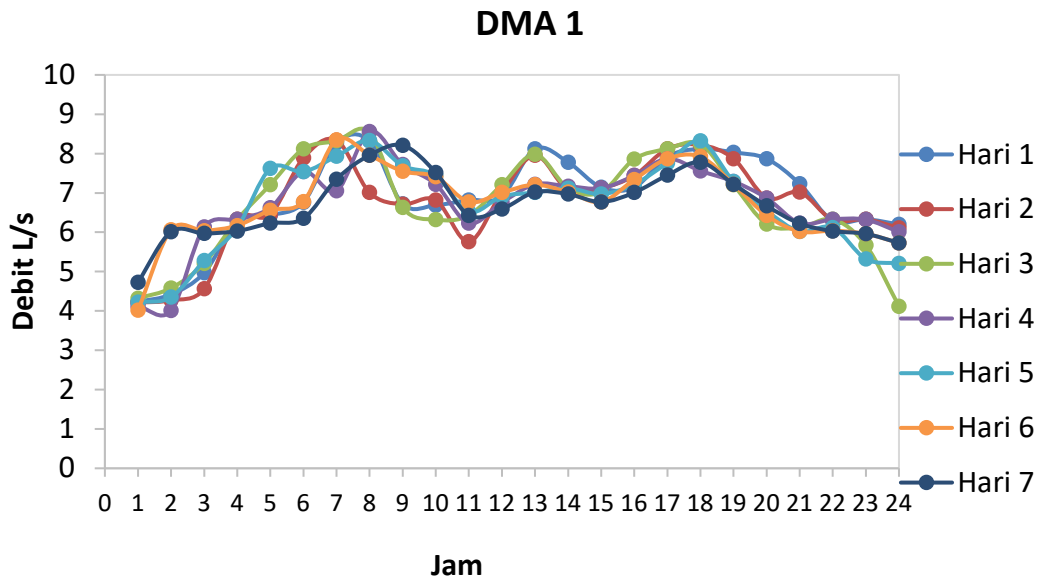
4.2 Fluktuasi Pemakaian dan Debit Air

Fluktuasi pemakaian debit air digunakan untuk menentukan waktu jam puncak dan jam minimum pemakaian air pada sistem distribusi. Jam puncak dan jam minimum yang diperoleh digunakan untuk menentukan waktu sampling dan pengujian parameter lapangan. Data pemakaian air yang digunakan dalam simulasi EPANET diperoleh dari data pemakaian pelanggan pada DMA 1 dan 2 Bukit Surungan selama satu minggu pada bulan Juni (**Tabel 4.1. Gambar 4.1** menyajikan fluktuasi pemakaian air di reservoir DMA 1 dan 2 Bukit Surungan PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang).

Tabel 4. 1 Data Fluktuasi Rata-rata Pemakaian Air

DMA	Waktu	Rata - rata (L/detik)	Rasio
DMA 1	00.00 - 01.00	4,26	0,6
	01.00 - 02.00	4,81	0,7
	02.00 - 03.00	5,45	0,8
	03.00 - 04.00	6,22	0,9
	04.00 - 05.00	6,73	1,0
	05.00 - 06.00	7,28	1,1
	06.00 - 07.00	7,94	1,2
	07.00 - 08.00	8,10	1,2
	08.00 - 09.00	7,32	1,1
	09.00 - 10.00	7,06	1,0
	10.00 - 11.00	6,42	1,0
	11.00 - 12.00	6,91	1,0
	12.00 - 13.00	7,50	1,1
	13.00 - 14.00	7,18	1,1
	14.00 - 15.00	6,99	1,0
	15.00 - 16.00	7,35	1,1
16.00 - 17.00	7,87	1,2	

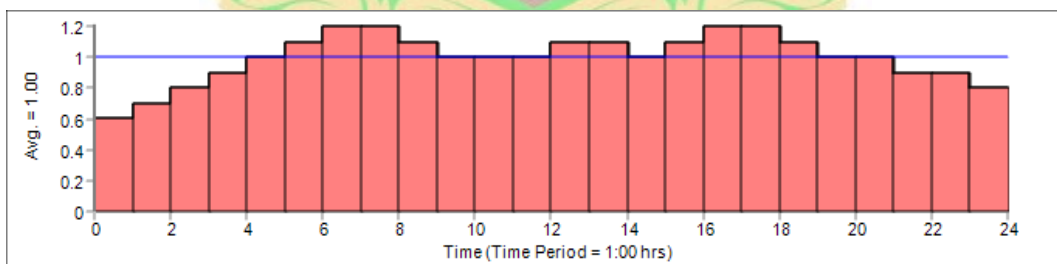
DMA	Waktu	Rata - rata (L/detik)	Rasio
	17.00 - 18.00	8,02	1,2
	18.00 - 19.00	7,45	1,1
	19.00 - 20.00	6,78	1,0
	20.00 - 21.00	6,41	1,0
	21.00 - 22.00	6,21	0,9
	22.00 - 23.00	5,98	0,9
	23.00 - 00.00	5,59	0,8
	Q Rata – Rata Harian (L/detik)	6,74	
	Q Jam Puncak (L/detik)	8,56	
	Faktor Jam Puncak	1,2	
DMA 2	00.00 - 01.00	4,00	0,727
	01.00 - 02.00	3,98	0,724
	02.00 - 03.00	3,94	0,717
	03.00 - 04.00	3,98	0,723
	04.00 - 05.00	4,54	0,825
	05.00 - 06.00	5,70	1,037
	06.00 - 07.00	6,60	1,199
	07.00 - 08.00	6,60	1,199
	08.00 - 09.00	6,58	1,196
	09.00 - 10.00	5,93	1,078
	10.00 - 11.00	5,81	1,057
	11.00 - 12.00	5,56	1,012
	12.00 - 13.00	5,80	1,055
	13.00 - 14.00	5,87	1,067
	14.00 - 15.00	6,06	1,102
	15.00 - 16.00	6,01	1,092
	16.00 - 17.00	6,30	1,145
	17.00 - 18.00	6,28	1,141
	18.00 - 19.00	6,24	1,135
	19.00 - 20.00	5,66	1,029
	20.00 - 21.00	5,21	0,948
	21.00 - 22.00	4,12	0,749
	22.00 - 23.00	4,11	0,748
	23.00 - 00.00	4,07	0,739
	Q Rata – Rata Harian (L/detik)	5,50	
	Q Jam Puncak (L/detik)	6,60	
	Faktor Jam Puncak	1,20	



(b)

Gambar 4. 1. Fluktuasi Pemakaian Air Mingguan a) DMA 1 dan b) DMA 2

Fluktuasi pemakaian air DMA 1 Bukit Surungan saat jam puncak terjadi pada pukul 06.00 WIB - 08.00 WIB dengan debit 7,94 L/detik - 8,10 L/detik dan jam minimum terjadi pada pukul 00.00 - 01.00 WIB dengan debit 4,26 L/detik. Rata-rata debit pemakaian air di DMA 2 Bukit Surungan adalah 5,50 L/detik, dengan debit puncak mencapai 6,60 L/detik. Faktor jam puncak untuk kedua DMA, yang dihitung dari rasio antara debit puncak harian dan debit rata-rata per jam, sebesar 1,20. Pola pemakaian air juga memperlihatkan perbandingan antara debit per jam dengan debit rata-rata harian. Dari aktivitas pemakaian air pelanggan di DMA 2 Bukit Surungan, pemakaian air cenderung rendah hingga mencapai titik minimum antara pukul 21.00 WIB dan 04.00 WIB, sementara pemakaian maksimum terjadi pada pagi hari antara pukul 06.00 WIB dan 08.00 WIB, serta pada sore hari antara pukul 17.00 WIB dan 19.00 WIB. Pola konsumsi ini selanjutnya digunakan untuk mensimulasikan sisa klor dan kinerja hidrolis jaringan distribusi berdasarkan waktu (*extended period simulation*) melalui *pattern editor* pada program EPANET, seperti pada **Gambar 4.2**. Pola pemakaian air menunjukkan perilaku pemakaian air oleh pelanggan air minum Bukit Surungan. Garis datar pada nilai ordinat 1 menunjukkan debit rata-rata terhadap satuan waktu. Data pola pemakaian air ini bersama dengan data dosis klorin pada reservoir, koefisien *Bulk* dan koefisien *Wall* digunakan untuk simulasi kandungan sisa klor dan analisis hidrolis jaringan distribusi DMA 1 dengan program EPANET.



Gambar 4.2. Pola Pemakaian Air Pada Outlet Reservoir

4.3 Konsumsi Air Pelanggan

Besarnya konsumsi air pelanggan dilakukan dengan mencatat meteran pelanggan setiap bulan, yang diidentifikasi menggunakan kode pada sistem baca meter milik PERUMDA Air Minum Kota Padang Panjang. Data yang terkumpul kemudian diakumulasikan untuk menghitung total pemakaian air selama bulan Juni 2021

(dalam liter per bulan) dan dikonversi ke satuan liter per detik sesuai dengan node atau junction yang mewakili setiap pelanggan.

Jumlah pelanggan DMA 1 Bukit Surungan memiliki pelanggan aktif sejumlah 655 pelanggan. Perhitungan nilai debit dihitung berdasarkan data pemakaian pelanggan. Rekapitulasi pemakaian air oleh pelanggan yang mewakili *junction* terdekat dapat dilihat pada **Tabel 4.2**. Angka yang diberi warna pada tabel tersebut menunjukkan lokasi yang sama dengan lokasi pengukuran parameter di lapangan. Hal ini dilakukan untuk menguji akurasi data simulasi di EPANET dengan pengukuran di lapangan pada beberapa *junction* yakni *junction 3*, *junction 12*, *junction 14* dan *junction 17*.

DMA 2 Bukit Surungan memiliki total 378 sambungan rumah (SR) sebagai pelanggan. Rata-rata debit suplai di DMA 2 selama bulan Juni adalah 5,26 L/detik, dengan faktor debit puncak (*q peak*) sebesar 1,2. Data suplai DMA ini diperoleh dari hasil pencatatan dan pemantauan rutin oleh petugas bagian distribusi PDAM Kota Padang Panjang, yang diidentifikasi melalui kode baca yang tercantum pada sistem. **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2. Rekapitulasi Pemakaian Air oleh Pelanggan Per Node/Junction

	<i>Node/Junction</i>	Qr (L/det)	Fp	Qp (L/det)
	<i>Junction 1</i>	0,329	1,2	0,395
	<i>Junction 2</i>	0,098	1,2	0,117
	<i>Junction 3</i>	0,678	1,2	0,814
	<i>Junction 4</i>	1,148	1,2	1,378
	<i>Junction 5</i>	0,082	1,2	0,098
	<i>Junction 6</i>	0,152	1,2	0,182
	<i>Junction 7</i>	0,350	1,2	0,420
	<i>Junction 8</i>	0,151	1,2	0,181
	<i>Junction 9</i>	0,664	1,2	0,797
DMA 1	<i>Junction 10</i>	0,136	1,2	0,163
	<i>Junction 11</i>	0,813	1,2	0,975
	<i>Junction 12</i>	0,285	1,2	0,342
	<i>Junction 13</i>	2,534	1,2	3,041
	<i>Junction 14</i>	0,162	1,2	0,194
	<i>Junction 15</i>	0,443	1,2	0,531
	<i>Junction 16</i>	0,489	1,2	0,587
	<i>Junction 17</i>	0,048	1,2	0,058
	<i>Junction 18</i>	0,061	1,2	0,073
	<i>Junction 19</i>	0,356	1,2	0,428
DMA 2	junction 2	0,129	1,2	0,155
	junction 3	0,095	1,2	0,114
	junction 4	0,075	1,2	0,091

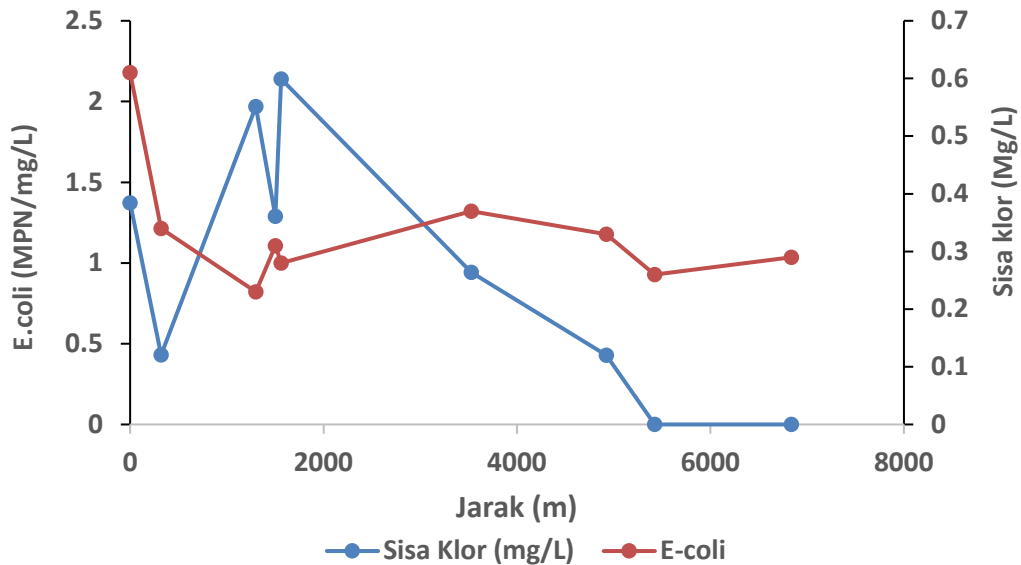
<i>Node/Junction</i>	<i>Qr (L/det)</i>	<i>Fp</i>	<i>Qp (L/det)</i>
junction 5	0,174	1,2	0,209
junction 6	0,316	1,2	0,379
junction 7	0,251	1,2	0,302
junction 8	0,092	1,2	0,110
junction 9	0,248	1,2	0,298
junction 10	0,129	1,2	0,155
junction 11	0,773	1,2	0,928
junction 12	0,461	1,2	0,553
junction 13	0,242	1,2	0,290
junction 14	0,145	1,2	0,174
junction 15	0,233	1,2	0,280
junction 16	0,038	1,2	0,046
junction 17	0,018	1,2	0,021
junction 18	0,062	1,2	0,075
junction 19	0,128	1,2	0,154
junction 20	0,053	1,2	0,063
junction 21	0,050	1,2	0,060
junction 22	0,038	1,2	0,046
junction 23	0,008	1,2	0,009
junction 24	0,017	1,2	0,021
junction 25	0,034	1,2	0,041
junction 26	0,210	1,2	0,251
junction 27	0,186	1,2	0,223

Keterangan: Junction 3 mewakili Jalan Soekarno-Hatta, junction 12 mewakili Jalan Rahmah Elyunusiah, junction 14 mewakili Jalan Prof. M. Yamin, junction 17 mewakili Jalan Hamid Hakim.

4.4. Hasil Pengukuran Lapangan *E. Coli* dan Sisa Klor

Konsentrasi *E.coli* dan sisa klor terhadap jarak pada DMA 1 dan DMA 2 ditunjukkan pada **Gambar 4.3**. *E.coli* ditemukan pada semua titik pengambilan sampel dari reservoir hingga lokasi terjauh di DMA 1 dan DMA 2. Berdasarkan jarak, kadar *E.coli* meningkat dari reservoir (1,3 MPN/100 ml) hingga jarak 1.560 m menjadi (2,14 MPN/100 ml), kemudian menurun hingga 0,42 MPN/100 ml pada jarak 4.924 m, dan kemudian turun menjadi nol mulai jarak 5.423 m di Jalan Moh. Yamin. Konsentrasi sisa klor menurun dari 0,61 mg/L di reservoir menjadi kisaran 0,23 - 0,34 mg/L pada jarak 320 m hingga 4.924 m dan cenderung stabil (0,26 - 0,29 mg/L) mulai jarak 5.473 m. Hal ini menunjukkan bahwa sisa klor pada reservoir cukup untuk mempertahankan konsentrasi *E.coli* menjadi nol mulai jarak 5.423 m jaringan distribusi DMA 1 dan DMA 2. Penurunan sisa klor di DMA 1 dan 2 Bukit Surungan juga disebabkan oleh reaksi klor dengan komponen organik atau mikroorganisme dalam pipa distribusi selama air didistribusikan ke konsumen. Dari hasil pemeriksaan parameter kimiawi kualitas air di waduk Bukit Surungan,

ditemukan kandungan logam seperti besi (Fe^{2+}) sebesar 0,02 mg/L dan mangan (Mn^{2+}) sebesar 0,01 mg/L. Kandungan ini menyebabkan klor bereaksi sepanjang jalur distribusi, menghasilkan proses reduksi dan oksidasi pada logam-logam tersebut, yang pada akhirnya semakin mengurangi kadar klor.



Gambar 4.3. Konsentrasi *E.coli* dan Sisa Klorin terhadap jarak dalam DMA 1 dan DMA 2

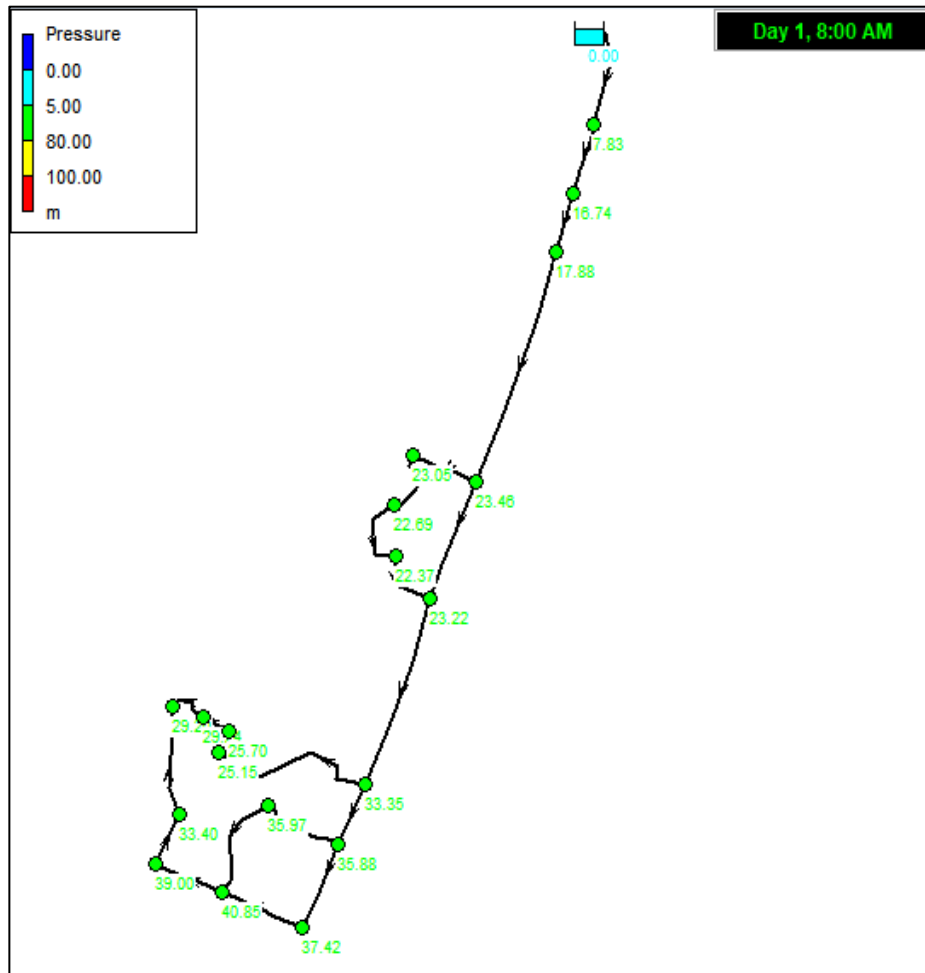
4.5 Simulasi Hidrolis Jaringan Distribusi

Simulasi hidrolis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja jaringan pipa distribusi menggunakan parameter tekanan dan kecepatan air sebagai indikator pada saat jam-jam puncak pemakaian. Data yang dimasukkan ke dalam software Epanet mencerminkan kondisi nyata di DMA 1 dan 2 Bukit Surungan, termasuk peta jaringan, elevasi, jenis dan diameter pipa, koefisien pipa, debit, serta pola pemakaian air pada setiap node.

4.5.1 Tekanan (P)

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27 tahun 2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum, tekanan minimal yang diperbolehkan adalah 5 meter (0,5 bar) pada titik distribusi terjauh. Hasil simulasi EPANET untuk jaringan distribusi DMA 1 menunjukkan bahwa tekanan yang dihasilkan memenuhi standar tersebut, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 4.4**. Simulasi ini menunjukkan bahwa

tekanan dalam jaringan distribusi DMA 1 berkisar antara 7 hingga 40 meter, yang berada di atas batas minimal. Simulasi juga menunjukkan adanya peningkatan tekanan air akibat perbedaan elevasi yang signifikan, yang menyebabkan peningkatan nilai tekanan.

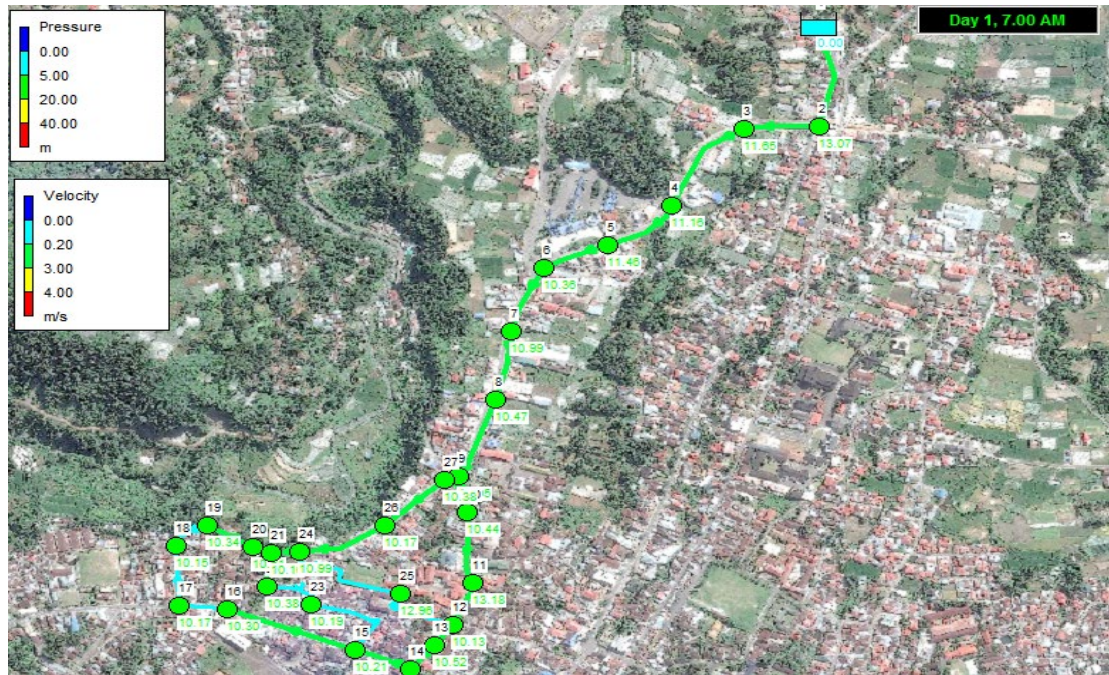


Gambar 4. 4. Simulasi Tekanan DMA 1

Hasil simulasi *software Epanet* pada jaringan distribusi DMA 2 menunjukkan nilai tekanan berkisar antara 0,94 bar - 1,13 bar yang telah sesuai standar kriteria dan secara keseluruhan telah memenuhi nilai tekanan minimal seperti terlihat **Gambar 4.5.**

4.5.2 Kecepatan

Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27 tahun 2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum, rentang kecepatan aliran pada jalur pipa distribusi adalah 0,3 - 6 m/detik.

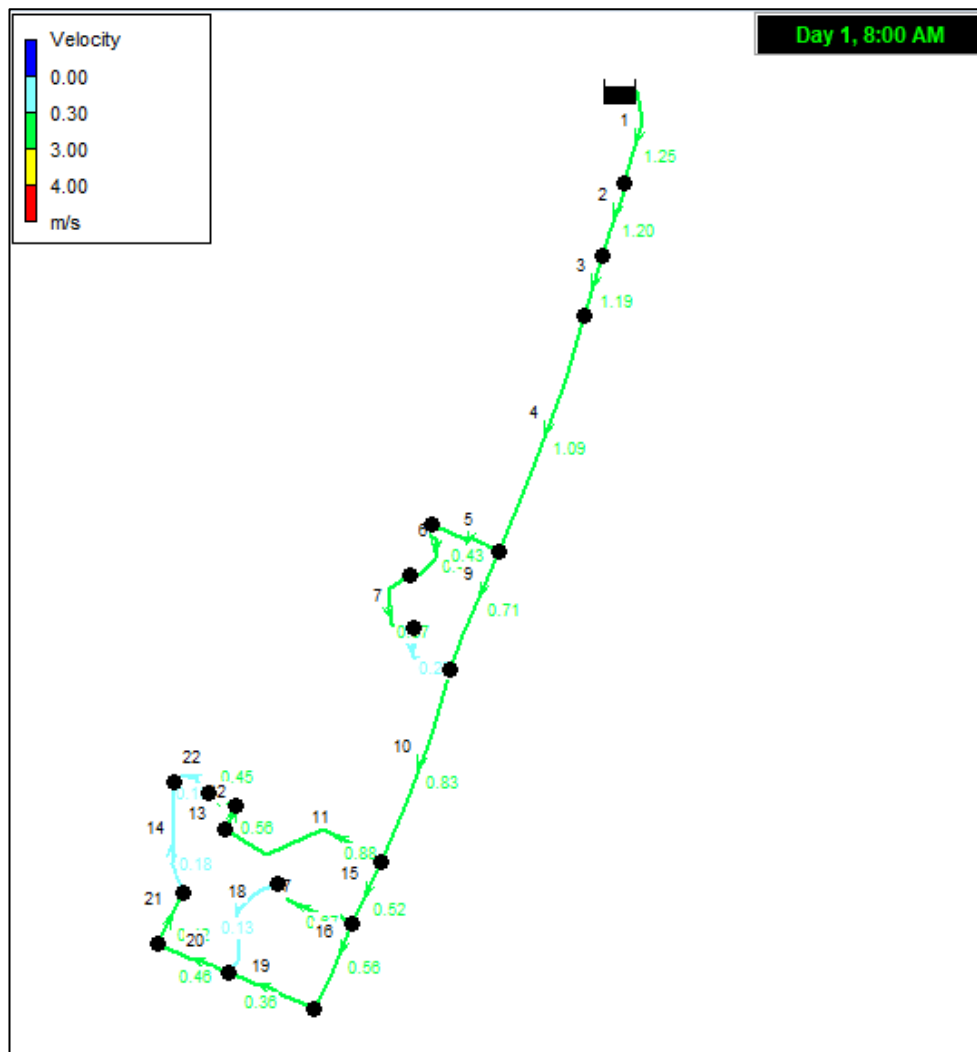


Gambar 4.5. Simulasi Tekanan DMA 2

Hasil simulasi EPANET pada jaringan distribusi DMA 1 menunjukkan bahwa beberapa pipa memiliki kecepatan aliran di bawah 0,3 m/detik, seperti terlihat pada **Gambar 4.6**. Kecepatan aliran yang berada di bawah batas minimum ditemukan pada pipa 8 (0,27 m/detik), pipa 14 (0,18 m/detik), pipa 18 (0,13 m/detik), dan pipa 22 (0,15 m/detik) di kawasan Jalan Hamid Hakim. Rendahnya kecepatan aliran pada pipa-pipa ini disebabkan oleh diameter pipa yang terlalu besar dibandingkan dengan debit aliran yang melewatinya. Kecepatan aliran yang rendah ini menyebabkan waktu tinggal air menjadi lebih lama, yang dapat menurunkan konsentrasi klorin dalam jaringan distribusi. Penurunan aliran air pada pipa juga dapat diakibatkan oleh berkurangnya *demand* sehingga jumlah aliran pada pipa berkurang mengakibatkan kecepatan aliran juga berkurang.

Upaya yang dapat dilakukan dalam menangani masalah ini yaitu dengan melakukan penyesuaian diameter pipa dengan tujuan mengoptimalkan parameter kecepatan dan kehilangan tekanan. Penyesuaian kecepatan pipa dapat dilakukan dengan mengganti diameter pipa 8 dari diameter 80 mm menjadi diameter 60 mm (2 inchi), pipa 11 dari 80 mm menjadi 76 mm (2 1/2 inchi), pipa 14 dari 50 mm menjadi 42 (11/4 inchi), pipa 17 dari 50 mm menjadi 76 mm (2 1/2 inchi), pipa 19 dari 50 mm menjadi 32 mm (1 inchi), dan pipa 22 dari 50 mm menjadi 22 mm (1/2

inchi).



Gambar 4.6. Simulasi Kecepatan DMA 1

Pipa di kawasan Jalan Rasidi masih memiliki kecepatan aliran di bawah 0,3 m/detik, yaitu pada Pipa 16 (0,07 m/detik), Pipa 17 (0,02 m/detik), Pipa 18 (0,14 m/detik), Pipa 22 (0,08 m/detik), Pipa 23 (0,03 m/detik), Pipa 25 (0,12 m/detik), dan Pipa 26 (0,07 m/detik). Kecepatan aliran yang rendah ini disebabkan oleh kemiringan pipa yang relatif landai di jaringan DMA 2, seperti terlihat pada **Gambar 4.7**. Selain itu, kecepatan aliran yang rendah juga diakibatkan oleh diameter pipa yang terlalu besar dibandingkan dengan debit aliran di dalamnya. Kecepatan aliran yang rendah mengakibatkan waktu tinggal air menjadi lebih lama, yang pada akhirnya dapat menurunkan konsentrasi klorin dalam jaringan.



Gambar 4. 7. Simulasi Kecepatan DMA 2

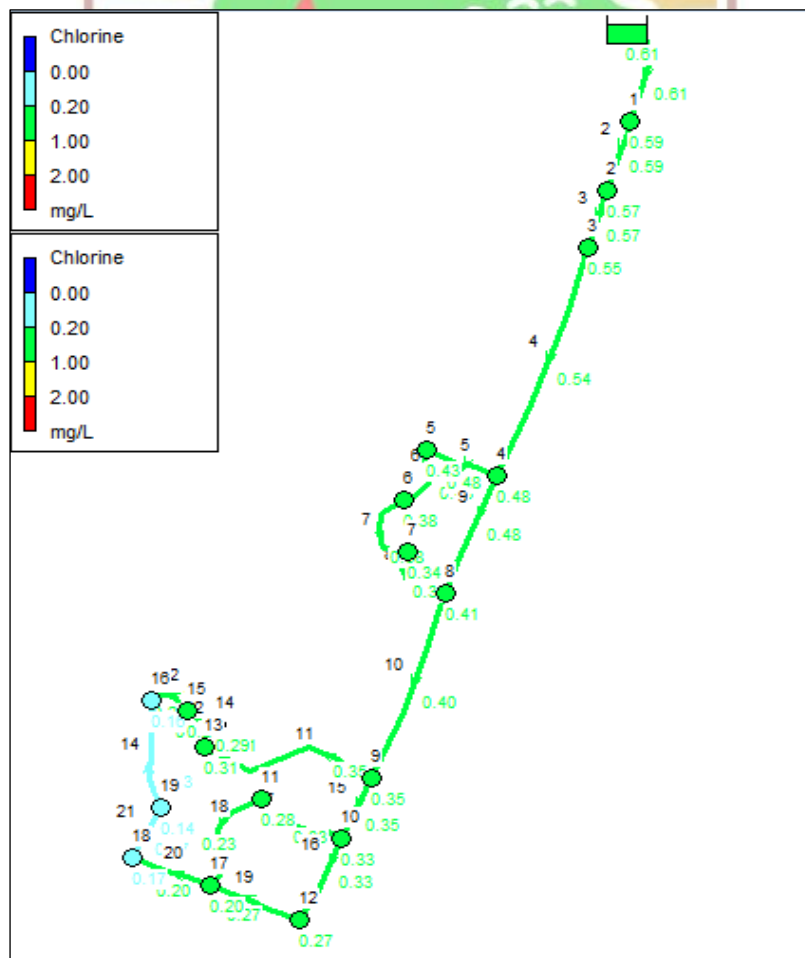
4.6 Simulasi Penyebaran Sisa Klor di Jaringan Distribusi

Untuk simulasi distribusi sisa klor, digunakan 20 node di DMA 1 dan 27 node di DMA2. Lebih banyak node yang disimulasikan untuk melihat gambaran distribusi di kedua DMA yang lebih rinci. Simulasi distribusi sisa klor dalam jaringan distribusi menggunakan nilai koefisien *bulk* dan koefisien *wall* yang diperoleh dari penelitian pengurangan klorin di outlet reservoir. Koefisien *bulk* akibat reaksi dengan komponen organik dan mikroorganisme di dalam pipa adalah -0,047. Nilai koefisien *wall* berdasarkan perhitungan nilai RMSE dengan *software Epanet 2.2* adalah -1,3 pada DMA 1 dan -0,1 pada DMA 2.

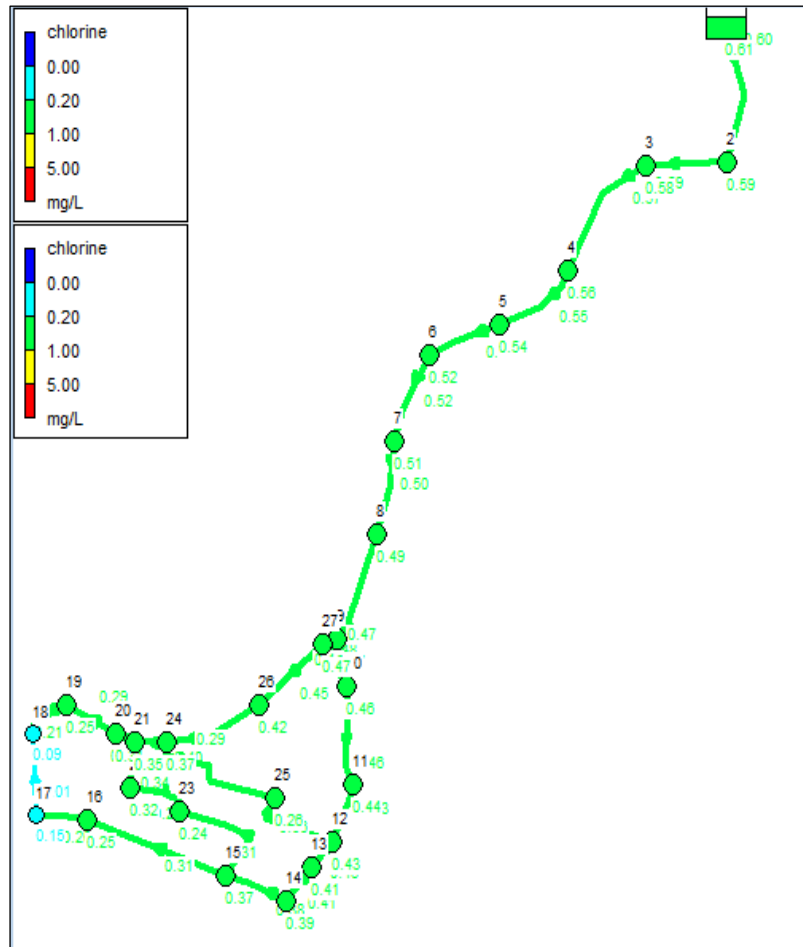
Hasil perhitungan koefisien *bulk* dan *wall* bernilai negatif menunjukkan terjadinya pengurangan kadar klor (Hsu et al. 2015). Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa variasi hasil yang diberikan oleh model hampir sama dengan variasi nilai observasinya. Semakin kecil nilai RMSE, semakin tinggi tingkat akurasi model tersebut.

Penyebaran sisa klor pada DMA 1 dan 2 Bukit Surungan secara umum tersebar menyeluruh di jaringan distribusi seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 4.8a** dan **Gambar 4.8b**.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kadar sisa klor di jaringan distribusi DMA 2 zona Bukit Surungan umumnya sudah memenuhi kriteria Peraturan Menteri Kesehatan No.736 Tahun 2010, bahwa kadar sisa klor minimal adalah 0,2 mg/L di titik terjauh dari jaringan distribusi. Simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi klor di jaringan distribusi berada dalam rentang 0,10 mg/L hingga 0,61 mg/L. Konsentrasi sisa klor tertinggi mencapai 0,61 mg/L yaitu di sumber, reservoir. Jaringan distribusi dengan sisa klor kurang dari 0,2 mg/L pada DMA 1 terdapat pada *junction* 16 (0,15 mg/L), *junction* 18 (0,16 mg/L), dan *junction* 19 (0,13 mg/L). Konsentrasi sisa klor terendah yang belum memenuhi persyaratan ditemukan di dua lokasi di DMA 2, yaitu pada *junction* 17 dengan kadar sisa klor 0,13 mg/L dan *junction* 18 dengan kadar sisa klor 0,10 mg/L. Kadar yang rendah berada di lokasi titik terjauh, yaitu berjarak 6.836 m dari reservoir.



(a) DMA 1



(b) DMA 2

Gambar 4. 8. Nilai Konsentrasi Klor a) DMA 1 b) DMA 2

Kadar sisa klor cenderung menurun terhadap jarak dari reservoir. Semakin jauh jarak antara reservoir dan konsumen, semakin rendah kadar sisa klor. Penurunan ini juga dipengaruhi oleh interaksi dengan dinding pipa serta reaksi kimia yang terjadi dalam pipa. Semakin lama air berada dalam jaringan (usia air), semakin banyak reaksi yang terjadi. Di Bukit Surungan, usia air berkisar dari 0,61 jam hingga 6,87 jam, terutama pada lokasi dengan kadar klor terendah, kecepatan aliran rendah, dan jarak terjauh dari reservoir. Kecepatan aliran yang lambat menyebabkan waktu tinggal yang lebih lama, sehingga kadar sisa klor semakin berkurang.

4.7 Perbandingan Kadar Sisa Klor dan Tekanan Simulasi *Epanet 2.2* dengan Pengukuran Lapangan

Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan sisa klor dan tekanan dianalisis dengan software *Epanet* melalui uji Root Mean Square Error (RMSE)

yang diperlihatkan pada Tabel 4.3. Nilai uji RMSE mendekati nol (0) menunjukkan bahwa simulasi mendekati nilai sebenarnya.

Tabel 4. 3. Perbandingan Nilai RMSE Sisa Klor dan Tekanan Simulasi Epanet dan Pengukuran Lapangan

DMA	Location	Pressure (m)		Residual Chlorine (mg/L)		Mean Error	Pressure	Mean Error	Residual Chlorine
		Measurement	EPANET	Measurement	EPANET				
DMA 1	Node 3	12,30	11,88	0,34	0,57	0,43	0,16	0,23	0,04
	Node 12	30,10	31,42	0,28	0,37	1,32	0,36	0,09	0,02
	Node 14	19,80	19,70	0,31	0,39	0,1	0,01	0,08	0,01
	Node 17	35,00	34,85	0,23	0,30	0,15	0,12	0,07	0,01
Total							0,66		0,08
RMSE							0,69		0,12
DMA 2	Node 3	11,30 m	11,65	0,42	0,56	0,35	0,12	0,14	0,02
	Node 7	10,70m	10,99	0,37	0,50	0,29	0,08	0,13	0,02
	Node 10	10,30 m	10,44	0,33	0,45	0,14	0,02	0,12	0,01
	Node 15	9,40 m	10,21	0,26	0,35	0,81	0,66	0,09	0,01
	Node 26	9,70 m	10,17	0,29	0,42	0,47	0,22	0,13	0,02
Total							1,10		0,08
RMSE							0,47		0,12

Perbandingan sisa klor dan tekanan hasil simulasi dan pengukuran lapangan didapatkan nilai RMSE sebesar 0,12. Hal ini berarti simulasi sisa klor yang dilakukan melalui program EPANET mendekati nilai sebenarnya di lapangan. Hasil perbandingan nilai pengukuran tekanan melalui simulasi dengan observasi lapangan didapatkan nilai RMSE sebesar 0,69 pada DMA 1 dan 0,47 pada DMA 2. Nilai tekanan hasil simulasi lebih besar terhadap tekanan pengukuran lapangan di awal jaringan, namun pada jarak yang lebih jauh tekanan cenderung menurun. Tekanan yang lebih tinggi diperoleh pada simulasi dibandingkan dengan pengukuran lapangan juga dapat diakibatkan oleh faktor kebocoran yang kemungkinan terjadi di lapangan yang tidak diperhitungkan pada *Epanet*. Pada lokasi terjauh, hasil simulasi pada sub bab sebelumnya diperoleh nilai sisa klor yang lebih kecil dari 0,2 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa pembubuhan klor di reservoir tidak mencukupi, sehingga di lokasi terjauh sisa klor tidak memenuhi persyaratan.

4.8 Analisis Hubungan Sisa Klor Terhadap *E. coli* dan Jarak, suhu, pH, dan Tekanan Terhadap Sisa Klor

Hubungan antara sisa klor dan *E. coli*, serta suhu, pH, jarak, dan tekanan terhadap sisa klor dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4. Nilai Korelasi Parameter Terhadap Sisa Klor

No	Parameter	Korelasi		Jenis Korelasi	
		DMA 1	DMA 2	DMA 1	DMA 2
1	Suhu	-0,846	-0,678	Sangat Kuat	Kuat
2	pH	-0,580	-0,614	Lemah	Kuat
3	Tekanan	-0,817	0,786	Sangat Kuat	Kuat
4	Jarak	-0,754	-0,821	Kuat	Sangat Kuat
5	<i>E. coli</i>	-0,116	0,198	Tidak Berkorelasi	Tidak berkorelasi

Pengukuran lapangan menunjukkan bahwa suhu berada dalam rentang 23-27 °C, semakin tinggi suhu, semakin berkurang kadar klor. Korelasi antara sisa klor dan suhu adalah -0,846 pada DMA 1 dan -0,678 pada DMA 2, menunjukkan adanya korelasi yang kuat. Peningkatan suhu air mengurangi efektivitas desinfektan karena penurunan keaktifan HOCl, sehingga kadar klor menurun (Achmit et al., 2018). Suhu yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan nilai koefisien *bulk* (Kb), mempercepat reaksi redoks, sehingga mengurangi konsentrasi klor dalam jaringan distribusi air (Avilaa et al., 2020).

Pengukuran nilai pH pada jaringan distribusi menunjukkan nilai pH berada pada rentang 7,07 - 7,95 dimana peningkatan pH diiringi dengan penurunan sisa klor. Sisa klor dengan pH memiliki nilai korelasi -0,580 di DMA 1 dan -0,614 di DMA 2 menunjukkan korelasi yang kuat. Perubahan pH dalam air mempengaruhi efektivitas klor. Kadar asam hipoklorit (HOCl) dipengaruhi oleh nilai pH. Klorinasi yang efektif berlangsung pada pH mendekati netral (7-7,5). Pada pH 7, asam hipoklorit memiliki keaktifan sebesar 80%, sedangkan pH 7,5 keaktifan menurun menjadi 50%, dan pada pH 8, keaktifan turun menjadi 40%. Jika pH melebihi 8, asam hipoklorit terionisasi menjadi ion hipoklorit, sehingga kadar asam hipoklorit berkurang. Penurunan asam hipoklorit dalam jaringan air minum mengurangi efektivitasnya untuk membunuh bakteri pada pipa distribusi (Achmit et al., 2018).

Nilai tekanan pada jaringan berada pada rentang 0,94 - 3,4 Bar. Uji korelasi *Pearson* antara sisa klor dengan tekanan diperoleh nilai 0,817, memiliki hubungan sangat kuat pada DMA 1 dan kuat di DMA 2, yaitu 0,786. Kadar sisa klor cenderung menurun seiring dengan menurunnya tekanan. Hubungan ini proporsional karena tekanan dan sisa klor dipengaruhi oleh jarak. Besarnya tekanan tergantung dari besarnya jarak dari lokasi pengukuran ke reservoir. Selain itu, perubahan tekanan air dapat mempengaruhi kecepatan aliran dalam pipa, dimana semakin jauh jarak, semakin rendah tekanan dan konsentrasi sisa klor (Shamsaei et al., 2013).

Korelasi *Pearson* antara sisa klor dan jarak adalah -0,754 pada DMA 1 dan -0,821 pada DMA 2, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara jarak dan sisa klor. Pengaruh jarak distribusi terhadap sisa klor menunjukkan bahwa semakin jauh jarak, semakin rendah kadar sisa klor dalam jaringan. Penurunan sisa klor disebabkan oleh jarak yang harus ditempuh air untuk mencapai pelanggan serta reaksi sisa klor dengan komponen-komponen dalam air (Baker, 2016). Klorin dalam pipa loop mengalami peluruhan akibat kombinasi peluruhan massal (bulk) dan dinding pipa (wall). Peluruhan massal juga dipengaruhi oleh umur air, yang tergantung pada jarak (panjang pipa) dan kecepatan aliran. Semakin lambat kecepatan aliran, semakin lama waktu tinggal air, sehingga sisa klor semakin berkurang. Penurunan klor akibat reaksi dengan dinding pipa dipengaruhi oleh kekasaran pipa, material, jenis pipa, dan diameter yang digunakan (Devarakonda et al., 2010).

Korelasi antara *E. coli* dan sisa klor menunjukkan nilai korelasi *Spearman* sebesar -0,116 pada DMA 1 dan -0,198 pada DMA 2, yang menunjukkan tidak adanya hubungan signifikan antara *E. coli* dan sisa klor. Klor dapat merusak sel bakteri, menyebabkan penurunan ukuran sel dan kerusakan dinding sel. Namun, bakteri yang mengalami kerusakan, seperti *E. coli*, masih dapat pulih dan tetap bersifat patogen bagi pengguna air. Konsentrasi disinfektan klor tidak memiliki efek terukur pada aktivitas bakteri tertentu sehingga bakteri *E. coli* aktif secara metabolik baik sebelum dan sesudah pemberian disinfektan (Williams & Braun, 2003).

Berdasarkan analisis korelasi antara parameter suhu, pH, jarak, tekanan, dan *E. coli* terhadap penyebaran sisa klor, suhu memiliki hubungan yang sangat kuat dengan

nilai korelasi -0,817 pada DMA 1, sementara jarak memiliki korelasi -0,821 pada DMA 2. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dalam jaringan distribusi air minum, semakin rendah kadar sisa klor, dengan korelasi suhu dan sisa klor yang sangat kuat dan negatif. Selain itu, semakin jauh jarak dalam jaringan distribusi air minum, semakin rendah kadar sisa klor di jaringan tersebut. Pada lokasi terjauh, kadar sisa klor bahkan turun di bawah 0,2 mg/L, menunjukkan bahwa dosis klor yang diterapkan tidak mencukupi. Korelasi antara sisa klor dan *E. coli* menunjukkan nilai 0,198, yang mengindikasikan adanya hubungan antara *E. coli* dan sisa klor dalam jaringan distribusi.

4.9 Analisis Praktik Keinsinyuran

Pekerjaan ini merupakan implementasi dari praktik keinsinyuran di bidang penyediaan air minum, dimana analisis data dan perhitungan menggunakan standar kriteria serta peraturan yang berlaku sebagai pedoman. Dalam kajian ini hasil pengukuran sisa klor atau *E. coli* di jaringan distribusi dibandingkan dengan Peraturan Menteri Kesehatan No. 736/Menkes/Per/VI/2010 dan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/Menkes/Per/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Sementara itu, hasil pengukuran dan simulasi tekanan dan kecepatan aliran di jaringan distribusi menggunakan EPANET dibandingkan dengan PermenPU. tahun 2007 tentang Penyelenggaraan pengembangan sistem penyediaan air minum. Hasil yang tidak memenuhi kriteria dianalisis penyebabnya dan direkomendasikan perbaikan serta saran untuk penelitian ke depannya.

Praktik keinsinyuran dari kegiatan ini sesuai dengan bidang kepakaran dan keahlian penulis di bidang penyediaan air minum, dimana ilmu teknik penyediaan air minum digunakan sebagai dasar ilmu pengetahuan dan teknologi dalam pengerjaan dan penyelesaian permasalahannya. Analisis pekerjaan ini juga berlandaskan pada kode etik insinyur dengan menjunjung tinggi prinsip-prinsip etika dan komitmen yang tinggi terhadap prinsip dan peri laku insinyur. Kode etik dan etika keinsinyuran sesuai dengan Kode Etik Insinyur (KEI) 2021 telah diaplikasikan dala kegiatan ini antara lain:

Prinsip Dasar no. 1. Mengutamakan keluhuran budi, keamanan, keselamatan

kesehatan, dan kemaslahatan masyarakat serta lingkungan. Pekerjaan ini mempertimbangkan aspek keamanan, keselamatan dan kemaslahatan masyarakat dan lingkungan, dimana kadar sisa klor maupun *E.coli* dalam jaringan distribusi perlu diawasi sesuai dengan peraturan yang berlaku agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia.

Prinsip Dasar no.2. Berpraktik hanya di bidangnya kompetensinya. Kompetensi penulis di bidang air minum ini sesuai dengan kompetensi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pekerjaan ini dengan baik dan tepat.

Prinsip Dasar no. 3. Menyatakan pendapat kepada publik hanya secara objektif dan berdasarkan kebenaran menyeluruh. Pekerjaan yang disusun oleh Penulis telah menggunakan informasi, data-data dan sumber yang relevan dan dapat dipertanggungjawabkan. Laporan dibuat secara objektif dan jujur tanpa adanya rekayasa data.

Prinsip Dasar no. 4. Bertindak sebagai pihak yang jujur dan dapat dipercayai kepada Pemberi Tugas atau Pemberi Pekerjaan. Penulis membuat laporan secara terstruktur dan sistematis berdasarkan data-data yang ada, sehingga hasil perancangan dapat dipertanggungjawabkan.

Prinsip Dasar No. 5. Menghindari perbuatan yang mengelabui. Dalam laporan data-data yang ditampilkan Penulis adalah data-data hasil pengamatan, wawancara, pengukuran lapangan dan analisis tanpa adanya manipulasi atau rekayasa.

Prinsip Dasar No.6. Berprilaku terhormat, penuh tanggung jawab, berbudi luhur, dan taat hukum demi menjunjung tinggi martabat, reputasi, dan kedayagunaan profesi. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas pekerjaan penelitian ini, mulai dari persiapan, pengumpulan data, pengukuran lapangan, analisis data, dan simulasi menggunakan software. Analisis, penyajian data serta pelaporan mengikuti ketentuan dan kaidah-kaidah yang berlaku.

4.10 Dampak terhadap Masyarakat dan Lingkungan

Praktik keinsinyuran ini memiliki dampak positif bagi masyarakat, terutama dengan meningkatnya kesehatan masyarakat dan mendorong stabilitas ekonomi di kota

Padang Panjang. Dengan adanya sisa klor yang tepat dan tanpa adanya pathogen di jaringan distribusi air minum dapat mengurangi prevalensi penyakit yang ditularkan melalui air seperti kolera, tifus, dan diare, sehingga populasi menjadi lebih sehat, tingkat kematian turun dan meningkatkan kebersihan. Hal ini tidak hanya mengurangi biaya perawatan kesehatan tetapi juga meningkatkan produktivitas dengan berkurangnya orang yang jatuh sakit.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa sisa klor berkisar antara 0,26 mg/L hingga 0,61 mg/L. Berdasarkan simulasi dengan software Epanet, sisa klor bervariasi antara 0,10 mg/L hingga 0,61 mg/L. Penurunan kadar sisa klor dalam jaringan distribusi cenderung sesuai dengan jarak dari reservoir. Pada jam puncak pemakaian, beberapa lokasi menunjukkan sisa klor di bawah 0,2 mg/L karena lokasi-lokasi tersebut berada jauh dari reservoir. Perbandingan antara hasil simulasi sisa klor dan tekanan dengan pengukuran lapangan dilakukan menggunakan uji Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengevaluasi kesesuaian antara data simulasi dari software Epanet dan pengukuran lapangan. Nilai RMSE untuk kadar sisa klor dan tekanan adalah 0,12 dan 0,69 pada DMA 1 serta 0,12 dan 0,47 pada DMA 2. Parameter yang paling berpengaruh terhadap sisa klor adalah suhu dengan nilai korelasi -0,817 pada DMA 1, dan jarak dengan korelasi -0,821 pada DMA 2. Sementara itu, sisa klor memiliki korelasi yang kuat dengan pH dan tekanan, tetapi tidak menunjukkan korelasi dengan *E. coli*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut:

1. Simulasi jaringan pembubuhan dosis kadar klor pada sumber agar sisa klor di jaringan memenuhi persyaratan.
2. Pengamatan penurunan sisa klor dan koefisien reaksi *bulk* dilakukan pada beberapa lokasi distribusi dengan waktu yang lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmit, M., Machkor, M., Nawdali, M., Sbai, G., Karim, S., Aouniti, A., & Loukili, M. (2018). Study of the Influence of the Operating Parameters on the Fractions in HOCl and OCl- During the Disinfection Phase. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 10(4), 122–127. www.jocpr.com
- Agustina, D. V. (2007). *Analisa Kinerja Sistem Distribusi Air Bersih PDAM Kecamatan Banyumanik Di Perumnas Banyumanik (Studi Kasus Perumnas Banyumanik Kel. Sronдол Wetan)*. Universitas Diponegoro Semarang.
- Alaerts, G., & Santika, S. S. (1987). *Metoda Penelitian Air*. Usaha Nasional. *Usaha Nasional*.
- Ali, M. (2010). *Peran Proses Desinfeksi Dalam Upaya Peningkatan Kualitas Produk Air Bersih* (Purnomo Edi Sasongko, Ed.). Upn Press.
- Apha, W. E. F. (1998). AWWA, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. In *Amer. Pub. Health Association. Washington DC*.
- Black & Veatch Corporation. (2010). White's handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. In *Wiley, Hoboken, N.J.*
- Crittenden, J. C., Trussel, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design. In *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR. (2007). *Buku Panduan Pengembangan Air Minum. Program, 20*, 1–47.
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z. B. M., Istandar, A., & Sigh, S. (2008). The Manager's Non-Revenue Water Handbook. *A Guide to Understanding Water Losses, Ranhill Utilities Bernhad and USAID, Malaysia*.
- Gil, M. I., Gómez-López, V. M., Hung, Y. C., & Allende, A. (2015). Potential of Electrolyzed Water as an Alternative Disinfectant Agent in the Fresh-Cut Industry. *Food and Bioprocess Technology*, 8(6), 1336–1348. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1444-1>
- Hermanto, joni. (2014). Evaluasi Dan Optimalisasi Instalasi Pengolahan Air Minum (Ipa I) Sungai Sengkuang Pdam Tirta Pancur Aji Kota Sanggau. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.26418/jtlb.v2i1.5406>
- Ibrahim, M., Masrevaniah, A., & Dermawan, V. (2011). *Analisa Hidrolis Pada Komponen Sistem Distribusi Air. 8*.
- Jawetz, Melnick, & Adelberg. (2007). Mikrobiologi Kedokteran Edisi 23 Penerjemah Geo F Brooks, Janet S Butel, Stephen A Morse. In *Buku Kedokteran EGC*.
- Joko, T. (2010). Unit Air Baku dalam Sistem Penyediaan Air Minum. In *Graha Ilmu*.

- LeChevallier, M. W. (2013). Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking-water. *Water Intelligence Online*, 12. <https://doi.org/10.2166/9781780405858>
- Menteri Kesehatan. (2002). *KEMENKES Nomor 907 Tahun 2002*. 1–20.
- Özdemir, Ö. (2018). Water leakage management by district metered areas at water distribution networks. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6559-9>
- Pemerintah Indonesia. (2015). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 122 Tahun 2015 Tentang Sistem Penyediaan Air Minum. *Standar Pelayanan Minimal*.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. (2005). Peraturan Pemerintah No. 16 Tahun 2005 Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum. *Peraturan Pemerintah No. 16 Tahun 2005 Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum*.
- Permenkes. (2010). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/Menkes/Per/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. In *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia*.
- PermenPU. (2007). *Penyelenggaraan pengembangan sistem penyediaan air minum*.
- Pizzi, N. (2010). Water Treatment: Principles and practices of water supply operations. In *American Water works Association: Water-operator training textbook*.
- Pratiwi, S. T. (2008). Mikrobiologi Farmasi. In *Erlangga*.
- PUPR, K. (2000). Pengenalan Program Epanet. *Perencanaan Teknis Air Minum Dengan Menggunakan Program Aplikasi Pengenalan Program Epanet*, 1–26.
- Rossmann, L. A. (2000). Epanet 2 User 's Manual. *National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati*. <https://doi.org/10.1177/0306312708089715>
- Sofia, E., Riduan, R., & Abdi, C. (2016). Evaluasi Keberadaan Sisa Klor Bebas Di Jaringan Distribusi Ipa Sungai Lulut PDAM Bandarmasih. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*. <https://doi.org/10.20527/jukung.v1i1.1043>
- Sujarweni, V. W. (2014). SPSS untuk Penelitian. In *SPSS untuk Penelitian*.
- Triatmadja, R. (2008). Sistem Penyediaan Air Minum Perpipaan. *Sistem Penyediaan Air Minum Perpipaan*.
- Tururaja, T., Moge, R. (2010). Bakteri Coliform di Perairan Teluk Doreri, Manokwari Aspek Pencemaran Laut dan Identifikasi Species. *Jurnal Ilmu Kelautan*.
- Washington State Department of Health. (2016). *What if coliform bacteria are found in my water? April, 2*.

World Health Organisation. (2007). pH in drinking-water. *Guidelines for Drinking Water Quality*.

Yekti, M. I., Gede Pebriarta Pratama, I. B., & Ngurah Purbawijaya, I. B. (2020). Mitigasi Non Revenue Water (NRW) Sistem Jaringan Distribusi pada District Meter Area (DMA) Zona Kota Blahbatuh PDAM Gianyar. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(2), 180.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v25i2.23619>

