



Penggunaan Sistem Dinamis Vensim PLE sebagai Analisis Kualitas dan Kuantitas Air PDAM Tirta Kencana Kabupaten Jombang

Selvy Dwi Kurnia¹, Aulia Ulfah Farahdiba^{1*}

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Email Korespondensi: aulahulfa.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 27-04-2022
Disetujui: 23-05-2022
Diterbitkan: 30-06-2023

Kata Kunci:

kualitas dan kuantitas air, vensim ple,
Escherichia coli

ABSTRAK

Kualitas air akan menurun seiring semakin jauhnya jarak distribusi dari instalasi pengolahan sehingga diberlakukan Permenkes No. 736 tahun 2010 yang mensyaratkan adanya kadar sisa klor sebesar 0,2 mg/l pada titik terjauh dari jaringan distribusi untuk menghindari adanya kontaminasi mikroorganisme. Penelitian ini menggunakan model dinamis VENSIM PLE untuk memberikan gambaran sederhana dan sistematis mengenai variabel-variabel yang mempengaruhi jaringan distribusi PDAM. Pada kondisi optimum untuk 12 hari menunjukkan kondisi yang cukup baik pada jarak 2 km dan 4 km jika ditinjau dari kualitas air berdasarkan parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Kebocoran pipa sangat berpengaruh karena menyebabkan masuknya senyawa organik maupun non-organik ke dalam jaringan distribusi. Selain itu, kebocoran pipa juga secara langsung dapat menyebabkan masuknya *Escherichia coli* yang berasal dari limbah domestik, utamanya tinja, di jaringan distribusi.

Received: 27-04-2022
Accepted: 23-05-2022
Published: 30-06-2023

Keywords:

Water quality and quantity, vensim ple
Escherichia coli

ABSTRACT

Water quality will decrease as the distribution distance from the treatment plant is getting farther away, so the Minister of Health Regulation No. 736 of 2010 which requires a residual chlorine content of 0.2 mg/l at the farthest point from the distribution network to avoid contamination by microorganisms. This study uses the VENSIM PLE dynamic model to provide a simple and systematic description of the variables that affect the PDAM. At the optimum conditions for 12 days, the conditions were quite good at a distance of 2 km and 4 km when viewed from the water quality based on *Escherichia coli* and residual chlorine parameters. Pipe leakage is very influential because it causes the entry of organic and inorganic compounds into the distribution network. In addition, pipe leaks can also directly cause the entry of *Escherichia coli* originating from domestic waste, especially feces, in the distribution network.

1. PENDAHULUAN

Air minum adalah "air yang telah diolah atau belum diolah yang memenuhi syarat kesehatan dan dapat langsung diminum", menurut Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492 Tahun 2010. Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/Menkes/SK/IV/2010 adalah peraturan pemerintah Indonesia yang menetapkan standar kualitas air minum. "Setiap penyedia air minum wajib memastikan bahwa air minum yang dihasilkan aman untuk digunakan manusia," menurut Pasal 2 aturan tersebut. Jika air minum memenuhi persyaratan fisik, mikrobiologi, kimia, dan radiologi yang ditetapkan dalam parameter wajib dan tambahan peraturan, air tersebut dianggap aman untuk dikonsumsi manusia (Menteri Kesehatan RI, 2010). Namun demikian, kualitas air yang disalurkan PDAM kepada konsumennya saat ini

belum/belum mencapai standar untuk air minum, namun masih dalam batas aman. Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 736 Tahun 2010 mengamanatkan konsentrasi residu klorin sebesar 0,2 mg/l pada titik terjauh dari jaringan distribusi untuk menghindari kontaminasi mikroorganisme karena jarak distribusi dari instalasi pengolahan semakin jauh. Kualitas air pelanggan tidak dapat dijamin berdasarkan hasil studi kualitas air produksi, terutama jika lokasinya jauh dari instalasi pengolahan air (Ratna, 2018).

Kualitas air minum dapat diartikan sebagai kondisi air minum yang ditinjau dari keberadaan bahan-bahan lain didalam air. Air minum harus dapat memenuhi kualitasnya berdasarkan standar kualitas air minum yang telah ditentukan. Standar kualitas air minum ditetapkan sebagai tolak ukur penentuan kualitas air yang layak konsumsi (Masduqi & Assomadi, 2016). Menurut Peraturan Menteri

Kesehatan No. 492 tahun 2010 tentang persyaratan kualitas air minum, air minum dikatakan aman bagi kesehatan apabila telah memenuhi persyaratan fisik, mikrobiologis, kimiawi dan radioaktif yang dimuat dalam parameter wajib dan parameter tambahan. Parameter wajib merupakan syarat utama kualitas air minum yang harus diikuti dan ditaati oleh seluruh penyelenggara air minum. Salah satu parameter wajib yang berhubungan langsung dengan kesehatan adalah mikrobiologi.

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kabupaten Jombang merupakan salah satu BUMD Pemerintah Kabupaten Jombang yang membidangi pengelolaan air bersih. Kehadiran Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kabupaten Jombang diperlukan untuk meningkatkan pelayanan air minum kepada masyarakat; keberadaan PDAM sangat penting bagi masyarakat untuk mendapatkan air bersih dan sehat yang memadai untuk kebutuhan rumah tangga dan industri guna menunjang pembangunan ekonomi dan derajat kesehatan.

Model sistem dinamis dapat digunakan sebagai alat pengambilan keputusan yang memungkinkan pengujian beberapa skenario kebijakan (Andhika & Hanani, 2013). Dalam penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Srikandi, (2018). Pada jaringan distribusi PDAM Wilayah Pelayanan IPAM Ngagel II Kota Surabaya, model sistem dinamik digunakan untuk memberikan penjelasan yang sederhana dan sistematis mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas air. Berdasarkan debit air produksi, jarak distribusi, kecepatan air, head loss utama, luas penampang pipa, dan diameter pipa, penelitian ini memberikan hasil analisis pemodelan dinamis untuk menentukan kualitas dan jumlah air di jaringan distribusi. menggunakan perangkat lunak untuk menilai kualitas dan kuantitas jaringan distribusi PDAM dengan *ventana Simulation personal learning edition* (Vensim PLE) (Srikandi, 2018).

Model sistem dinamis dapat digunakan sebagai alat pengambilan keputusan yang memungkinkan pengujian beberapa skenario kebijakan (Andhika & Hanani, 2013). Dalam penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Srikandi, (2018). Pada jaringan distribusi PDAM Wilayah Pelayanan IPAM Ngagel II Kota Surabaya, model sistem dinamik digunakan untuk memberikan penjelasan yang sederhana dan sistematis mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas air. Berdasarkan debit air produksi, jarak distribusi, kecepatan air, head loss utama, luas penampang pipa, dan diameter pipa, penelitian ini memberikan hasil analisis pemodelan dinamis untuk menentukan kualitas dan jumlah air di jaringan distribusi. menggunakan perangkat lunak untuk menilai kualitas dan kuantitas jaringan distribusi PDAM dengan *ventana Simulation personal learning edition* (Vensim PLE).

2. METODE

2.1 Deskripsi Wilayah

Penelitian dilaksanakan di salah satu IPA milik Perumdam Tirta Kencana Kabupaten Jombang yang berada di Jl. Raya Gedek - Ploso, Jati Mawo, Jatigedong, Kec. Ploso, Kabupaten Jombang. Letak lokasi penelitian terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (IPA PDAM Kabupaten Jombang)

2.2 Pengambilan Sampel

IPAM Perumdam Tirta Kencana Kabupaten Jombang menjadi lokasi penelitian. Sebanyak 3 (tiga) titik sampel diambil dari pipa pelayanan yang terhubung dengan kran rumah warga yang diharapkan dapat mewakili wilayah pelayanan PDAM Tirta Kencana Kabupaten Jombang Kudu IPA yaitu titik sampel yang paling dekat dengan instalasi pengolahan (2 km), titik sampel di tengah area pelayanan (4 km), dan titik sampel terjauh dari instalasi pengolahan (2 km) (8 km). Simulasi model ini didasarkan pada tiga (tiga) skenario utama, yaitu skenario moderat, pesimis, dan optimis. Setiap skenario akan dipecah menjadi tiga (tiga) model yang masing-masing akan mewakili tiga (tiga) titik sampel dari layanan. Lokasi titik sampling penelitian terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi titik sampling penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Proyeksi Jumlah Pelanggan

Data kenaikan pelanggan aktif PDAM Kabupaten Jombang dari tahun 2017 hingga tahun 2021 diperlukan untuk memprediksi jumlah konsumen di wilayah layanan IPA Kudu PDAM Kabupaten Jombang di masa yang akan datang. Dengan menggunakan Rumus Regresi Linier dan data jumlah pelanggan aktif dan kebutuhan air bersih di wilayah layanan IPA Kudu, PDAM Kabupaten Jombang, maka jumlah pelanggan PDAM Kabupaten Jombang di wilayah layanan IPA Kudu dapat diperkirakan dari tahun 2022 hingga 2041.

Tabel 1. Proyeksi jumlah pelanggan

No	Tahun	Prediksi Jumlah Pelanggan
1	2022	1.549
2	2023	1.557
3	2024	1.564
4	2025	1.572

No	Tahun	Prediksi Jumlah Pelanggan
5	2026	1.580
6	2027	1.588
7	2028	1.590
8	2029	1.592
9	2030	1.595
10	2031	1.599
11	2032	1.605
12	2033	1.612
13	2034	1.620
14	2035	1.625
15	2036	1.632
16	2037	1.636
17	2038	1.643
18	2039	1.650
19	2040	1.655
20	2041	1.662

3.2 Proyeksi Debit

Debit IPA Kudu PDAM Kabupaten Jombang dapat diantisipasi pada tahun 2022 hingga 2041 dengan menggunakan perhitungan menggunakan Rumus Regresi Linier berdasarkan data jumlah pelanggan aktif dan realisasi penggunaan air bersih di wilayah pelayanan PDAM IPA Kudu Jombang Daerah. Tabel 2 dapat digunakan untuk memperjelas prediksi debit IPA Kudu PDAM Kabupaten Jombang yang dibutuhkan pada tahun 2022 hingga 2041:

Tabel 2. Proyeksi Kebutuhan Air IPA Kudu

No	Tahun	Debit Yang dibutuhkan
1	2022	16.290
2	2023	16.378
3	2024	16.466
4	2025	16.554
5	2026	16.642
6	2027	16.730
7	2028	16.818
8	2029	16.906
9	2030	16.994
10	2031	17.082
11	2032	17.170
12	2033	17.258
13	2034	17.346
14	2035	17.434
15	2036	17.522
16	2037	17.610
17	2038	17.699
18	2039	17.787
19	2040	17.875
20	2041	17.963

3.3 Input Data Menggunakan Persamaan Regresi

Persamaan hasil analisis regresi residu khlor terhadap *Escherichia coli*, jarak distribusi, dan kebocoran pipa digunakan dari data primer dan sekunder untuk mendapatkan besar kecilnya pengaruh antar variabel tersebut terhadap aliran variabel residu klor. Hal ini disebabkan oleh suatu kondisi yang disebut kebocoran pipa, yang menyebabkan peningkatan jumlah mikroorganisme dalam sistem distribusi. Akibatnya, persamaan regresi yang menggambarkan hubungan pengaruh antara keempat variabel harus ditentukan. Data jarak sebaran, sisa khlor,

Escherichia coli, dan nilai kebocoran pipa yang diperoleh dari data sekunder disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Jarak Distribusi, Sisa Klor, *Escherichia coli*, dan Kebocoran Pipa

No	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Ecoli	Kebocoran Pipa
1	2000	0.09	0	0
2	2000	0.08	2	0.1
3	2000	0.09	5	0.1
4	2000	0.09	4	0.1
5	4000	0.04	10	0.1
6	4000	0.05	13	0.1
7	4000	0.04	15	0.1
8	8000	0.03	18	0.25
9	8000	0.02	17	0.25
10	8000	0.02	20	0.25

Persamaan regresi tersebut selanjutnya dapat menjadi masukan untuk formulasi pada model dinamik yang telah dibuat berdasarkan data jarak distribusi, sisa klorin, nilai kebocoran pipa, dan *Escherichia coli* tersebut di atas.

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa variabel jarak distribusi, *Escherichia coli*, dan kebocoran pipa secara individual atau parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel residual, dengan nilai uji F pada analisis varians (Anova) dan uji T parsial memiliki nilai P 0,000 dimana nilainya 0,05. klorin. Residu klorin = $0,144 - (0,000015 \text{ Jarak Distribusi} + 0,000020 \text{ Escherichia coli} + 0,011 \text{ Kebocoran Pipa})$, sesuai dengan persamaan regresi.

Nilai intersep yang diperoleh dari persamaan regresi adalah 0,144 yang artinya jika variabel perubahan yaitu jarak distribusi, kebocoran pipa, dan *Escherichia coli* semuanya nol maka sisa klor memiliki nilai awal sebesar 0,144.

Koefisien determinasi (*R square*) ditemukan sebesar 88,3% menunjukkan bahwa *Escherichia coli*, kebocoran pipa, dan jarak distribusi dapat menjelaskan hingga 88,3% dari semua variasi sisa klorin, dengan komponen lain menyumbang 11,7% variasi. Dalam penelitian ini tidak ada model atau faktor yang digunakan sebagai variabel bebas. Nilai *R square* menunjukkan bahwa model yang dibuat secara akurat menggambarkan hubungan antara keempat variabel.

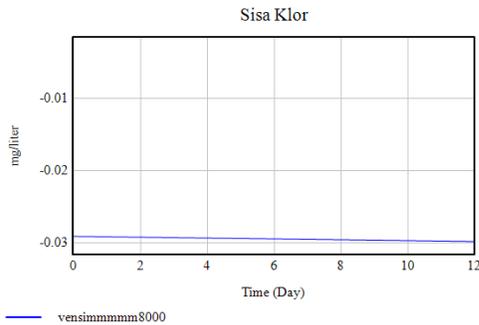
3.4 Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk menjamin bahwa model yang dibangun dapat menginterpretasikan kejadian di lapangan. Suatu model dikatakan valid jika infrastruktur sistem yang disediakan dalam bentuk diagram, unit pengukuran, dan persamaan yang mendasarinya secara akurat mewakili hubungan sebab-akibat dalam model. Validasi untuk pemodelan sistem dinamis dilakukan dengan menggunakan dua uji validasi. (Srikandi, 2018).

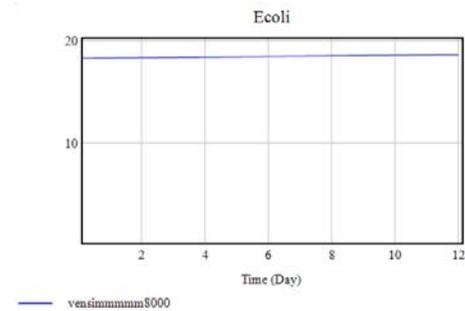
3.5 Uji Parameter Model

Uji parameter model dilakukan dengan melihat 2 (dua) variabel yang saling berhubungan untuk mengetahui konsistensi dan hubungan antar variabel di dalam model yang kemudian membandingkannya dengan hasil logika aktual. Pada model ini digunakan variabel sisa klor dan *Escherichia coli* yang memiliki hubungan loop negatif.

Artinya, jika sisa klor meningkat maka jumlah *Escherichia coli* pada air akan menurun. Begitupun sebaliknya, jumlah *Escherichia coli* akan meningkat jika konsentrasi klor dalam air menurun (Srikandi, 2018). Logika ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi yang dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Uji Parameter Model Sisa Klor



Gambar 4. Uji Parameter Model *Escherichia coli*

Pola grafik pertama menunjukkan bahwa sisa klor yang ditandai dengan garis biru semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jumlah *Escherichia coli* pada grafik kedua yang ditandai dengan garis biru, seperti terlihat pada gambar di atas yang merupakan hasil simulasi untuk parameter model uji. Dari hasil pengujian parameter model dapat diketahui bahwa semakin rendah kadar sisa klor maka semakin besar perkembangan bakteri *Escherichia coli*.

Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Andhika et al. (2013) bahwa terjadi penurunan kandungan bakteri *Escherichia coli* di air yang diinjeksikan klor. Sehingga berdasarkan hasil uji parameter model (Model Parameter Test) tersebut, parameter simulasi model sudah berjalan sesuai dengan logika actual sehingga model dapat dikatakan valid.

3.6 Uji Perilaku Model/Replika

Secara kuantitatif validasi model dilakukan dengan metode black box. Metode ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai hasil simulasi dengan nilai actual di lapangan untuk menemukan nilai error dari model yang telah dibangun (Srikandi, 2018).

Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$E = |(S - A) / A| \text{ dengan,}$$

E = Variansi error antara data actual dengan data hasil simulasi

S = Data hasil simulasi

A = Data actual

Jika nilai $E < 0,1$ maka model dapat dikatakan valid.

Model jaringan distribusi PDAM ini disimulasikan selama 12 hari dengan data actual lapangan yang diperoleh dengan cara sampling untuk parameter sisa klor dan *Escherichia coli* dengan 9 (sembilan) titik sampling. Titik sampling berada pada 3 titik zona terdekat dengan layanan IPAM, 3 titik zona yang berada di pertengahan wilayah pelayanan, dan 3 titik zona terjauh dari IPAM kemudian dari hasil di cari rata-rata dari 3 titik tersebut yang nantinya akan di simulasikan dan dibandingkan dengan hasil actualnya. Berikut tabel perhitungan error pada pemodelan ini

Tabel 4. Perhitungan Error Model Jaringan Distribusi PDAM

Jarak (m)	Sisa Klor (mg/l)		Error
	Simulasi (S)	Aktual (A)	
2000	0.091	0.087	0.045
4000	0.042	0.043	0.023
8000	0.029	0.027	0.074
Rata-Rata	0.054	0.052	0.047

Karena nilai error rata-rata $< 0,1$ maka model ini dinyatakan valid.

3.7 Simulasi Model Berdasarkan Jarak Distribusi

Simulasi model berdasarkan jarak distribusi dilakukan setelah model dinyatakan valid dari berbagai uji sebelumnya. Simulasi model ini berdasarkan 3 (tiga) jenis skenario utama, yaitu skenario moderat, skenario pesimis, dan skenario optimis.

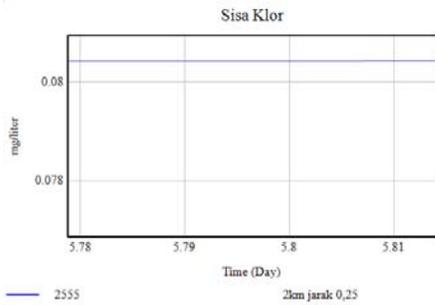
Skenario yang diterapkan pada model berdasarkan jarak distribusi ini adalah scenario dengan variabel kontrol persen kebocoran pipa karena berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Afrianita et al., (2016) variabel ini merupakan salah satu dari faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi secara signifikan kualitas dan kuantitas air pada jaringan distribusi PDAM.

Selain itu, setiap skenario terdapat 3 (tiga) model yang merupakan 3 (tiga) titik sampel dari wilayah pelayanan IPA Kudu Jombang dengan hasil simulasi masing-masing berupa prediksi kualitas air berdasarkan parameter sisa klor dan *Escherichia coli* serta prediksi kuantitas air berdasarkan debit air pada jaringan distribusi hingga hari ke-12.

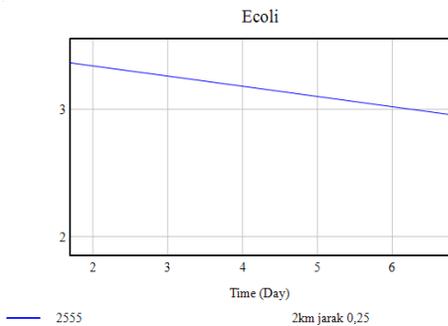
3.8 Skenario Moderat (Kondisi Eksisting)

Skenario ini diterapkan berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi air IPA Kudu, yaitu ketika persen kebocoran pipa sebesar 25% yang merupakan hasil trial and error yang disesuaikan dengan hasil pengukuran parameter di lapangan.

1. Kualitas Air (Parameter Sisa Klor dan *Escherichia coli*)
 a. Jarak Distribusi 2 km dengan Kebocoran Pipa 25%



Gambar 5. Hasil Simulasi Sisa Klor Pada Skenario Moderat (2 Km)



Gambar 6. Hasil Simulasi *Escherichia coli* Pada Skenario Moderat (2 Km)

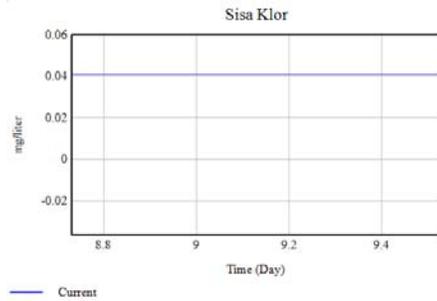
Tabel 5. Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (2 km)

Day s	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Ecoli
1	2000	0.082	3.4
2	2000	0.082	3.3
3	2000	0.082	3.2
4	2000	0.082	3.1
5	2000	0.082	3.1
6	2000	0.082	3
7	2000	0.082	2.9
8	2000	0.082	2.8
9	2000	0.082	2.7
10	2000	0.082	2.6
11	2000	0.082	2.6
12	2000	0.082	2.5

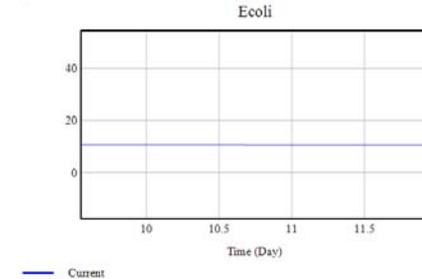
Sumber: Hasil Analisa (2022)

Berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi dengan 25% kebocoran pipa, pada jarak 2 km dari reservoir sisa klor masih dapat mendesinfeksi *Escherichia coli* yang kemungkinan masuk ke dalam sistem jaringan akibat adanya kebocoran pipa. Jarak distribusi yang mencapai 2 km tidak terlalu berpengaruh terhadap penurunan sisa klor. Hal ini dibuktikan dengan konsentrasi sisa klor pada jarak tersebut hingga hari ke-12 masih mencapai 0,082 mg/l.

- b. Jarak Distribusi 4 km dengan Kebocoran Pipa 25%



Gambar 7. Hasil Simulasi Sisa Klor Pada Skenario Moderat (4 km)



Gambar 8. Hasil Simulasi *Escherichia coli* Pada Skenario Moderat (4 km)

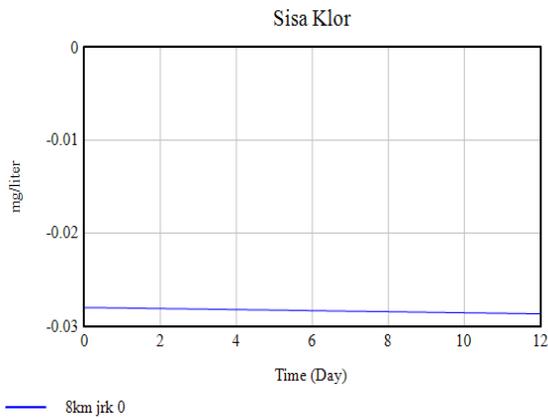
Tabel 6. Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (4 km)

Day	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Ecoli
1	4000	0.037	12
2	4000	0.037	12
3	4000	0.037	12
4	4000	0.037	12
5	4000	0.037	12
6	4000	0.037	12
7	4000	0.037	12
8	4000	0.037	12
9	4000	0.037	12
10	4000	0.037	12
11	4000	0.037	12
12	4000	0.037	12

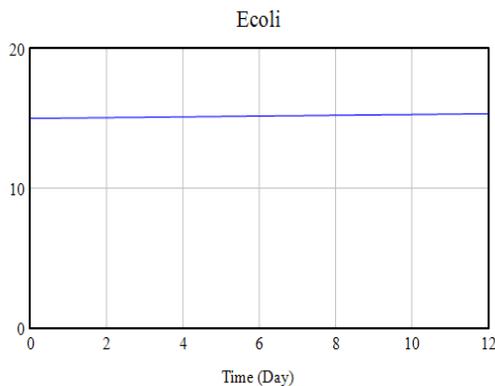
Sumber: Hasil Analisa (2022)

Berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi pada jarak 4 km dari reservoir dengan 25% kebocoran pipa, terjadi penurunan konsentrasi sisa klor menjadi 0,037 mg/l dari 0,082 mg/l pada jarak 2 km. Pada Gambar 4 dan Tabel 4 juga menunjukkan adanya *Escherichia coli* sebesar 12 MPN/100 ml sampel pada jaringan distribusi meskipun konsentrasi sisa klor sebesar 0,037 mg/l. Hal ini kemungkinan dikarenakan model pada penelitian ini tidak memperhitungkan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi penurunan konsentrasi sisa klor seperti jenis pipa dan umur pipa sehingga hasil simulasi tetap menunjukkan adanya *Escherichia coli* yang disebabkan oleh kebocoran pipa.

- c. Jarak Distribusi 8km dengan Kebocoran Pipa 25%



Gambar 9. Hasil Simulasi Sisa Klor Pada Skenario Optimis (8 km)



Gambar 10. Hasil Simulasi *Escherichia coli* Pada Skenario Optimis (8 km)

Tabel 7. Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (8 km)

Day	Jarak Distribusi	Sisa klor	Ecoli
1	8000	0.028	15
2	8000	0.028	15
3	8000	0.028	15
4	8000	0.028	15
5	8000	0.028	15
6	8000	0.028	15
7	8000	0.028	15
8	8000	0.028	15
9	8000	0.028	15
10	8000	0.028	15
11	8000	0.028	15
12	8000	0.028	15

Sumber: Hasil Analisa (2022)

Walaupun tingkat kebocoran pipa yang diskenarioakan merupakan kondisi yang optimum, yaitu 20%, sisa klor masih ada 0.028 mg/l pada jarak 8 km dan *Escherichia coli* telah mencapai 15 MPN/100 ml. Hal ini membuktikan bahwa sisa klor akan semakin menurun jika jarak distribusi semakin jauh dan *Escherichia coli* semakin meningkat.

3.9 Kualitas Air (Debit Air Distribusi) dengan Kebocoran Pipa 20%

Hasil simulasi untuk prediksi debit air hingga hari ke-12 ditunjukkan pada Tabel 8. Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 8, debit air mengalami penurunan yang disebabkan adanya asumsi kebocoran pipa sebesar 20% pada jaringan distribusi. Debit air mengalami penurunan sekitar 19,8% - 20,2% dari debit air produksi. Pada simulasi skenario optimum ini tidak ada perbedaan debit air distribusi pada jarak 2 km, 4 km, dan 8 km. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini variabel yang mempengaruhi langsung debit air distribusi adalah debit air produksi dan kecepatan air sehingga jarak distribusi tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap debit air distribusi.

Tabel 8. Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Optimis

Day	Debit Air Produksi	Debit Air Distribusi
1	0,053	0.042
2	0,041	0,032
3	0,046	0.036
4	0,046	0.036
5	0,048	0.038
6	0,043	0.034
7	0,046	0.036
8	0,046	0.036
9	0,046	0.036
10	0,045	0.035
11	0,045	0.035
12	0,048	0.038

Sumber: Hasil Analisa (2022)

Berdasarkan 3 (tiga) skenario yang disimulasikan, pada skenario moderat yang merupakan kondisi eksisting dengan 25% kebocoran pipa menunjukkan *Escherichia coli* meningkat signifikan di jarak 8 km. Jumlah *Escherichia coli* yang mencapai 18 MPN/100 ml selain disebabkan oleh konsentrasi sisa klor yang telah habis juga dipengaruhi oleh kebocoran pipa jaringan distribusi. Kebocoran pipa menyebabkan masuknya senyawa organik maupun non-organik ke dalam jaringan distribusi sehingga mengakibatkan terbentuknya biofilm pada pipa yang merupakan substrat mikroorganisme. Selain itu, kebocoran pipa juga secara langsung dapat menyebabkan masuknya *Escherichia coli* yang berasal dari limbah domestik, utamanya tinja, di jaringan distribusi.

Kebocoran pipa pada kondisi ekstrim untuk 12 (Duabelas Hari) hari di jarak 2 km, 4 km, dan 8 km dapat menjadi variabel paling berpengaruh terhadap kualitas air, yaitu ditinjau dari parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 2 km sisa klor telah habis akibat adanya kebocoran pipa. Hal ini dikarenakan jumlah *Escherichia coli* lebih dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor.

Pada kondisi optimum untuk 12 hari prediksi menunjukkan kondisi yang cukup baik pada jarak 2 km dan 4 km jika ditinjau dari kualitas air berdasarkan parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 4 km konsentrasi sisa klor sebesar 0,040 mg/l sehingga masih dapat mendesinfeksi mikroorganisme yang masuk akibat adanya kebocoran pipa. Namun, ketika jarak distribusi mencapai 8 km terjadi penurunan klor yang disebabkan oleh bulk reaction dan pipe wall reaction. Afrianita et al (2016)

menunjukkan bahwa antara jarak distribusi dengan sisa klor dalam jaringan distribusi air minum semakin jauh jarak distribusi maka konsentrasi sisa klor akan semakin menurun. Penurunan sisa klor yang merupakan desinfektan ini menyebabkan tumbuhnya *Escherichia coli* yang berasal dari

kontaminasi akibat kebocoran pipa. Pada Tabel 9 berikut menunjukkan perbandingan debit air berdasarkan kebocoran pipa 25% yang merupakan skenario moderat, skenario pesimis berupa kebocoran pipa sebesar 50%, dan kebocoran pipa 20% yang merupakan skenario optimis.

Tabel 9. Perbandingan Kualitas Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis

Jarak Distribusi (m)	H Ke-	Skenario Moderat		Skenario Pesimis		Skenario Optimis	
		Sisa Klor (mg/l)	E-coli (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	E-coli (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	E-coli (MPN/100 ml sampel)
2000	1	0.082	3.4	0	4	0.088	3
	2	0.082	3.3	0	4	0.087	2.9
	3	0.082	3.2	0	4	0.087	2.8
	4	0.082	3.1	0	4	0.087	2.7
	5	0.082	3.1	0	4	0.087	2.6
	6	0.082	3	0	4	0.087	2.5
	7	0.082	2.9	0	4	0.087	2.4
	8	0.082	2.8	0	5	0.086	2.3
	9	0.082	2.7	0	5	0.086	2.1
	10	0.082	2.6	0	5	0.086	2
	11	0.082	2.6	0	5	0.086	2
	12	0.082	2.5	0	5	0.086	1.9
4000	1	0.037	12	0	15	0.040	11
	2	0.037	12	0	15	0.040	10.9
	3	0.037	12	0	15	0.040	10.9
	4	0.037	12	0	15	0.040	10.8
	5	0.037	12	0	15	0.040	10.8
	6	0.037	12	0	15	0.040	10.7
	7	0.037	12	0	15	0.040	10.7
	8	0.037	12	0	15	0.040	10.7
	9	0.037	12	0	15	0.040	10.6
	10	0.037	12	0	15	0.040	10.6
	11	0.037	12	0	15	0.040	10.5
	12	0.037	12	0	15	0.040	10.5
8000	1	0.017	18	0	18	0.028	15
	2	0.017	18	0	18	0.028	15
	3	0.017	18	0	19	0.028	15
	4	0.017	18	0	19	0.028	15
	5	0.017	18	0	20	0.028	15
	6	0.017	18	0	20	0.028	15
	7	0.017	18	0	20	0.028	15
	8	0.017	18	0	21	0.028	15
	9	0.017	18	0	21	0.028	15
	10	0.017	18	0	21	0.028	15
	11	0.017	18	0	22	0.028	15
	12	0.017	18	0	22	0.028	15

Kuantitas air berupa debit air distribusi pada penelitian ini hanya dipengaruhi oleh kebocoran pipa sehingga penurunannya juga cenderung signifikan utamanya pada skenario pesimis dengan kebocoran pipa sebesar 50%. Pada skenario moderat penurunan debit air sebesar 24,4% - 25,2%, pada skenario pesimis penurunan debit air mencapai 49,5% - 50% sedangkan pada skenario optimis debit air mengalami penurunan mencapai 19,8% - 20,2%. Persentase penurunan debit air tersebut tidak berbeda jauh dari nilai persentase kebocoran pipa yang diasumsikan. Hal ini

dikarenakan pada penelitian ini variabel yang mempengaruhi langsung debit air distribusi adalah debit air produksi dan kecepatan air sedangkan variabel lain seperti jarak distribusi tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap debit air distribusi.

Tabel 10. Perbandingan Debit Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis

H ke -	Debit Air Produ ksi (m ³ /s)	Debit Air Distribusi (m ³ /s)		
		Skenario Moderat/Kon disi Eksisting (25% Kebocoran Pipa)	Skenario Pesimis/Kon disi Ekstrim (50% Kebocoran Pipa)	Skenario Optimis/Kon didi Optimum (20% Kebocoran Pipa)
1	0,053	0.039	0.026	0.042
2	0,041	0.030	0,020	0,032
3	0,046	0.034	0.023	0.036
4	0,046	0.034	0.023	0.036
5	0,048	0.036	0.024	0.038
6	0,043	0.032	0.022	0.034
7	0,046	0.034	0.023	0.036
8	0,046	0.034	0.023	0.036
9	0,046	0.034	0.023	0.036
10	0,045	0.033	0.022	0.035
11	0,045	0.033	0.022	0.035
12	0,048	0.036	0,024	0.038

4. SIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai persentase kebocoran pipa menjadi variabel utama terhadap penurunan kualitas dan kuantitas air PDAM Tirta Kecana Kabupaten Jombang yang didistribusikan ke pelanggan.

Ada 3 Skenario yang di ambil yaitu Skenario Moderat (Kondisi Eksisting), Skenario Pesimis (Kondisi Ekstrim), dan Skenario Optimis (Kondisi Optimum). Pada skenario moderat merupakan kondisi eksisting dengan 25% kebocoran pipa menunjukkan *Escherichia coli* meningkat signifikan di jarak 8 km. Jumlah *Escherichia coli* yang mencapai 18 MPN/100 ml. Kebocoran pipa pada kondisi ekstrim dengan 50% untuk 12 hari di jarak 2 km, 4 km, dan 8 km dapat menjadi variabel paling berpengaruh terhadap

kualitas air, yaitu ditinjau dari parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 2 km sisa klor telah habis akibat adanya kebocoran pipa dan ecoli pada jarak 8 km mencapai 22 MPN/100 ml. Pada kondisi optimum untuk 12 hari prediksi menunjukkan kondisi yang cukup baik pada jarak 2 km dan 4 km jika ditinjau dari kualitas air berdasarkan parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 4 km konsentrasi sisa klor sebesar 0,040 mg/l sedangkan *Escherichia coli* mencapai 10 MPN/100 ml sehingga masih dapat mendesinfeksi mikroorganisme yang masuk akibat adanya kebocoran pipa. Namun, ketika jarak distribusi mencapai 8 km terjadi penurunan klor menjadi 0,028 dan *Escherichia coli* mencapai 15 MPN/100 ml. Kebocoran pipa sangat berpengaruh karena menyebabkan masuknya senyawa organik maupun non-organik ke dalam jaringan distribusi. Selain itu, kebocoran pipa juga secara langsung dapat menyebabkan masuknya *Escherichia coli* yang berasal dari limbah domestik, utamanya tinja, di jaringan distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrianita, R., Komala, P. S., & Andriyani, Y. (2016). Kajian Kadar Sisa Klor di Jaringan Distribusi Penyediaan Air Minum Rayon 8 PDAM Kota Padang. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Lingkungan II, Universitas Andalas*.
- Andhika, D. J. D., & Hanani, T. (2013). Kadar Sisa Chlor dan Kandungan Bakteri E. Coli Perusahaan Air Minum Tirta Moedal Semarang Sebelum dan Sesudah Pengolahan. *Jurnal Kesehatan Masyarakat, 2*(2).
- Masduqi, A. dan Assomadi, A. F., (2016), *Operasi dan Proses Pengolahan Air*, Second Edition, ITS Press, Surabaya.
- Menteri Kesehatan RI. (2010). *Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492 Tahun 2010*.
- RATNA. (2018). Evaluasi Pengelolaan IPAL Komunal di Kabupaten Sleman. *Universitas Islam Indonesia*
- Srikandi, E. K. A. D. (2018). *Dengan Sistem Dinamis (Studi Kasus: Wilayah Layanan Ipam Ngagel Ii Kota Surabaya) Modeling Of Water Distribution Network Using Dinamic System. Jurnal Lingkungan*