



TESIS - RE142541

**PEMODELAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI PDAM
DENGAN SISTEM DINAMIS
(Studi Kasus: Wilayah Layanan IPAM Ngagel II
Kota Surabaya)**

**EKA DIAN SRIKANDI
3315201208**

**DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc**

**PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



THESIS - RE142541

**MODELING OF WATER DISTRIBUTION NETWORK
USING DINAMIC SYSTEM**
(Case Study: Water Treatment Plant Service Area of
Ngagel II Surabaya)

EKA DIAN SRIKANDI
3315201208

SUPERVISOR
Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL, AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Eka Dian Srikandi

NRP. 3315201208

Tanggal Ujian : 29 Desember 2017

Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh :

1. **Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc**
NIP : 19550128 198503 2 001

(Pembimbing)

2. **Dr. Ir. Mohammad Razif, M.M.**
NIP : 19530502 198103 1 004

(Penguji)

3. **Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl.SE., M.Sc., Ph.D**
NIP : 19600308 198903 1 001

(Penguji)

4. **Dr. Ali Masduqi, ST., MT**
NIP : 19680128 199403 1 003

(Penguji)

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dekan,



LD AA Warmadewanthi, S.T., M.T., PhD

NIP. 19750212 199903 2 001

**PEMODELAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI PDAM
DENGAN SISTEM DINAMIS
(Studi Kasus: Wilayah Layanan IPAM Ngagel II Kota Surabaya)**

Nama Mahasiswa : Eka Dian Srikandi
NRP : 3315201208
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc

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. Hasil evaluasi kualitas air produksi tidak dapat menjamin kualitas air pelanggan khususnya pelanggan yang berada jauh dari instalasi pengolahan air.

Penelitian ini menggunakan model dinamis STELLA untuk memberikan gambaran sederhana dan sistematis mengenai variabel-variabel yang mempengaruhi jaringan distribusi PDAM untuk kemudian disimulasikan ke dalam 3 (tiga) skenario utama, yaitu skenario moderat, skenario pesimis, dan skenario optimis yang akan menjadi acuan dalam pemilihan strategi berdasarkan aspek lingkungan dan aspek finansial.

Penelitian ini menunjukkan bahwa model dinamis jaringan distribusi PDAM dipengaruhi oleh banyak faktor yang saling mempengaruhi dalam hubungan sebab-akibat seperti kebocoran pipa, debit air produksi, debit air distribusi, jarak distribusi, kecepatan air, *headloss mayor*, luas penampang pipa, diameter pipa, pH, sisa klor, *Escherichia coli*, dan debit air. Hasil simulasi pada skenario pesimis dengan kebocoran pipa sebesar 50% dan skenario optimis dengan kebocoran pipa 20% menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat kebocoran pipa maka semakin dekat jarak pos desinfeksi yang harus dibangun dari instalasi pengolahan air. Strategi yang dapat diterapkan berdasarkan aspek lingkungan, yaitu peningkatan kualitas dan debit air produksi serta peningkatan kualitas air di pelanggan sedangkan jika ditinjau berdasarkan aspek kelayakan finansial dengan *Net Present Value* (NPV) diperoleh Rp. 186.017.856.110,- *Benefit Cost Ratio* (BCR) sebesar 5,66, *Internal Rate Return* (IRR) sebesar 7,51%, dan *Payback Periode* (PP) adalah 1 tahun 3 bulan maka pengembangan jaringan IPAM Ngagel II layak untuk dilaksanakan.

Kata kunci : *Escherichia coli*, sisa klor, skenario, STELLA

Halaman ini sengaja dikosongkan

**MODELING OF WATER DISTRIBUTION NETWORK USING
DINAMIC SYSTEM
(Case Study: Water Treatment Plant Service Area of Ngagel II
Surabaya)**

By : Eka Dian Srikandi
Student Identity Number : 3315201208
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc

ABSTRACT

Water quality will decrease as the distant distances away from the reservoir so Minister of Health Regulation No. 736/Menkes/SK/IV/2010 is issued by the government as the quality standard for drinking in Indonesia of 0.2 mg / l at the farthest point of the distribution network to avoid contamination of microorganisms. The results of the evaluation of the quality of the production water cannot guarantee the quality of the customer's water, especially the customers who are away from the water treatment plant.

This study used STELLA, a dynamic model programming, to provide a simple and systematic description of the variables that affected the water supply company in Indonesia (PDAM) distribution network to be simulated into 3 (three) main scenarios, they were moderate scenario, pessimistic scenario, and optimistic scenario that will be the reference in the selection strategy based on environmental aspects and financial aspects.

This research showed that the dynamic model of PDAM distribution network is influenced by many factors that influenced each other in causal relationship such as pipeline leakage, water flow production, water flow distribution, distribution distance, water velocity, major headloss, pipe cross-sectional area, pipe diameter, pH, chlorine residual, *Escherichia coli*, and water flow. Simulation results showed that in pessimistic scenario with 50% of pipe leakage and optimistic scenario with 20% of pipe leakage indicated that the higher pipe leakage rate the closer disinfection post distance should be built from the water treatment plant. Strategy could be applied based on environmental aspect, that is quality improvement and production water flow as well as improvement of water quality in customer while based on financial feasibility aspect with Net Present Value (NPV) obtained Rp. 186.017.856.110,-, 5.66 of Benefit Cost Ratio (BCR), 7.51% of Internal Rate Return (IRR) and Payback Period (PP) was a year and 3 months then the development of IPAM Ngagel II distribution network is feasible to be implemented.

Key words : chlorine residual, *Escherichia coli*, scenario, STELLA

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji bagi Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Pemodelan Pada Jaringan Distribusi PDAM dengan Sistem Dinamis (Studi Kasus: Wilayah Layanan IPAM Ngagel II PDAM Kota Surabaya)**” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penulisan tesis ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Ungkapan terima kasih penulis sampaikan secara tulus mengingat tanpa bantuan mereka penyusunan tesis ini tidak akan berjalan sebagaimana mestinya.

Ucapan terima kasih yang tak terkira untuk kedua orangtua tercinta, yaitu Bapak **La Oden Dohali, S.Pd** dan Ibu **Rosmala, A.M.K.**, atas setiap kasih sayang, doa, pengorbanan dan perhatiannya selama ini serta kedua adikku **Iin Primawati** dan **Halim Jayadi**. Semoga kita semua selalu berada dalam lindungan Allah Subhanahu Wa Ta'ala.

Pada kesempatan ini pula penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang terhormat:

1. Ibu **Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc**, selaku dosen pembimbing yang atas keikhlasannya meluangkan waktu, memberikan petunjuk, saran, dan pemikirannya dalam membimbing penulis.
2. Bapak **Dr. Ir. Mohammad Razif, MM.**, Bapak **Dr. Ali Masduqi, ST., MT.**, Bapak **Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl.SE., M.Sc., Ph.D.**, dan Ibu **Ipung Fitri Purwanti, ST., MT., Ph.D.**, selaku dosen penguji yang telah membimbing dan memberikan kritik serta saran mengenai penelitian ini.
3. Bapak **Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.**, selaku dosen wali penulis yang selalu memberikan saran dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan.

4. Bapak dan Ibu PDAM Surya Sembada Kota Surabaya yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu.
5. Bapak dan Ibu warga di lokasi pengambilan data penelitian yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu.
6. Bapak dan Ibu Laboran di Laboratorium Pemulihan Air, Laboratorium Limbah Padat dan B3, dan Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
7. Mbak Kiki dan Mbak Sabrina yang selalu memberikan dukungan dan saran mengenai penelitian ini.
8. Ibu Tien, Kak Rina, Mas Rizki (Undip), Made Angga (ITB), Mas Aidhil, Nisa As'ad, dan Indriyani yang telah memberikan bantuan selama proses pengerjaan tesis ini.
9. Teman-teman alumni TL Unhas cabang Surabaya, Nuries, Annas, Jabrik, dan Kak Ansari.
10. *Enjel Family* di Kendari yang selalu membantu tanpa kenal waktu selama pengerjaan tesis ini, khususnya **Astri Priyani**.
11. Teman-teman S2 Teknik Lingkungan angkatan 2015 genap, Juwita, Tia, Rima, Dita, Mbak Desi, Mas Hendy, Nash, Hendra, Mas Taufik, dan Mas Andre, dan
12. Seluruh pihak yang telah membantu penulis yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu.

Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala membalas semua amal kebaikan dan kita semua mendapatkan ridho dariNya. Aamiin.

Surabaya, Januari 2018

Eka Dian Srikandi

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Air Minum	7
2.2 Kualitas Air Minum	7
2.2.1 Parameter Mikrobiologi	8
2.2.2 Parameter Kimiawi	10
2.3 Jaringan Pipa Distribusi	11
2.4 Pemodelan Sistem Dinamis	14
2.5 Program STELLA	17
2.6 Analisis Kelayakan Finansial	18
2.7 Gambaran Umum PDAM Surya Sembada Kota Surabaya	21
2.8 Penelitian Terdahulu	25
BAB 3 METODE PENELITIAN	27
3.1 Tahapan Peneltian	27
3.2 Kerangka Penelitian	27
3.2.1 Ide Penelitian	27
3.2.2 Studi Literatur	29

3.2.3 Pengumpulan Data	29
3.2.4 Pembuatan Struktur Model	33
3.2.5 Simulasi dengan Program STELLA 9.1.3	34
3.2.6 Verifikasi dan Validasi Model	34
3.2.7 Hasil dan Pembahasan	35
A. Aspek Teknis	35
B. Aspek Lingkungan	36
C. Aspek Finansial	37
3.2.8 Kesimpulan dan Saran	38
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Aspek Teknis	39
4.1.1 Pemodelan Jaringan Distribusi dengan Sistem Dinamis.....	39
1. Perancangan Model Konseptual	39
2. <i>Stock-Flow</i> Diagram	44
3. Verifikasi dan Validasi Model.....	50
4.1.2 Simulasi Model Jaringan Distribusi	55
1. Skenario Moderat (Kondisi Eksisting)	56
2. Skenario Pesimis (Kondisi Ekstrim)	61
3. Skenario Optimis (Kondisi Optimum)	67
4.1.3 Perbandingan Antar Skenario	72
4.1.4 Manfaat Tiap Skenario Bagi PDAM Kota Surabaya	77
4.2 Aspek Lingkungan	82
4.3 Aspek Finansial	87
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	97
5.1 Kesimpulan	97
5.2 Saran	97
DAFTAR PUSTAKA	99
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Metode Analisa Sampel	33
Tabel 3.2 Strategi, Sasaran, dan Langkah Operasional dalam Kajian Aspek Lingkungan	37
Tabel 4.1 Identifikasi Variabel Model Sistem Dinamis	40
Tabel 4.2 Formulasi Model	43
Tabel 4.3 <i>Graph Of Time Input</i> Debit Air Produksi	44
Tabel 4.4 Data Jumlah <i>Escherichia coli</i>	47
Tabel 4.5 Data Jarak Distribusi, Sisa Klor, <i>Escherichia coli</i> , pH, dan Kebocoran Pipa	48
Tabel 4.6 Hubungan Antar Variabel Model	52
Tabel 4.7 Perhitungan <i>Error</i> Model Jaringan Distribusi PDAM	55
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (5 km)	56
Tabel 4.9 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (7 km)	58
Tabel 4.10 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (10 km)	60
Tabel 4.11 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Moderat	61
Tabel 4.12 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (5 km)	62
Tabel 4.13 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (7 km)	64
Tabel 4.14 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (10 km)	65
Tabel 4.15 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Pesimis	67
Tabel 4.16 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (5 km)	68
Tabel 4.17 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (7 km)	69
Tabel 4.18 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (10 km)	70
Tabel 4.19 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Optimis	72
Tabel 4.20 Perbandingan Kualitas Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis	73
Tabel 4.21 Perbandingan Debit Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis	76
Tabel 4.22 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Investasi.....	87
Tabel 4.23 Biaya Operasional IPAM Ngagel II per Tahun	88

Tabel 4.24 Asumsi Perhitungan Laba Bersih IPAM Ngagel II	89
Tabel 4.25 Rekapitulasi <i>Benefit</i> dan <i>Benefit Present Value</i>	91
Tabel 4.26 Rekapitulasi <i>Cost</i> dan <i>Cost Present Value</i>	92
Tabel 4.27 Perhitungan <i>Trial and Error</i> untuk IRR	94
Tabel 4.28 Perhitungan Interpolasi	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh <i>Causal Loop Diagram</i>	14
Gambar 2.2 Contoh <i>Stock and Flow Diagram</i>	15
Gambar 2.3 Peta Pelayanan Instalasi Produksi PDAM Surya Sembada Kota Surabaya	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 3.2 Peta Lokasi Pengambilan Sampel	31
Gambar 4.1 <i>Causal Loop</i> Jaringan Distribusi PDAM	41
Gambar 4.2 Model Dinamis Jaringan Distribusi PDAM	42
Gambar 4.6 Verifikasi Unit Model	50
Gambar 4.7 Verifikasi Struktur Model	51
Gambar 4.8 Uji Parameter Model (<i>Model Parameter Test</i>)	53
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (5 km)	56
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (7 km)	58
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (10 km)	59
Gambar 4.12 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (5 km)	62
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (7 km)	63
Gambar 4.14 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (10 km)	65
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (5 km)	68
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (7 km)	69
Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (10 km)	70
Gambar 4.18 Peta Lokasi <i>Post-Chlorination</i> IPAM Ngagel II Kota Surabaya ...	79
Gambar 4.19 <i>Gas Feeder</i> untuk Proses Desinfeksi Gas Klor	85
Gambar 4.20 Tabung Gas Klor dan <i>Gas Feeder</i>	80
Gambar 4.21 Pompa <i>Booster</i>	86

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu amanat pemerintah yang tertuang dalam Peraturan Presiden Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) periode 2015-2019 adalah 100% akses layanan air minum yang layak bagi seluruh lapisan masyarakat Indonesia (*universal access*). Sasaran utama *universal access* ini adalah 60% akses aman air minum melalui jaringan perpipaan dan 40% akses aman air minum melalui jaringan bukan perpipaan terlindungi serta tercapainya PDAM sehat 100% di Indonesia.

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik pada periode 2004-2014, persentase akses aman air minum nasional sebesar 22,93% dan setiap tahunnya mengalami peningkatan rata-rata 1,93% sehingga pada akhir tahun 2014 akses aman air minum telah mencapai 68,11% (BPS, 2014). Sedangkan pada tahun 2015 yang merupakan tahun pertama dari program 100% akses aman air minum pemerintah, cakupan layanan mengalami peningkatan hingga mencapai 71,05% (SPAM PUPR, 2016).

Strategi utama yang dijalankan untuk mencapai *universal access* dalam layanan air minum tersebut adalah dengan pembangunan dan pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di seluruh Indonesia. Penyelenggaraan SPAM sendiri dilaksanakan oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) dalam rangka menjamin hak rakyat terhadap air minum, akses terhadap pelayanan air minum, dan terpenuhinya kebutuhan air minum sehari-hari masyarakat (PUPR, 2015).

Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/Menkes/SK/IV/2010 merupakan regulasi yang dikeluarkan oleh pemerintah sebagai standar baku kualitas air minum di Indonesia. Pada pasal 2 dalam peraturan tersebut menyebutkan “Setiap penyelenggara air minum wajib menjamin air minum yang diproduksinya aman bagi kesehatan”. Dikatakan aman bagi kesehatan apabila air minum tersebut telah memenuhi persyaratan fisik, mikrobiologi, kimiawi, dan radioaktif yang dimuat

dalam parameter wajib dan parameter tambahan pada peraturan tersebut (Permenkes, 2010). Namun, saat ini kualitas air yang dialirkan oleh PDAM hingga ke pelanggan tidak/belum memenuhi kualitas standar air minum, tetapi dalam batas kualitas air bersih (Falmuriati, 2015). Survei yang dilakukan oleh Yayasan Lembaga Konsumen Indonesia (YLKI) pada bulan Oktober 2016 di Yogyakarta bahkan menemukan sekitar 73% air pipa yang merupakan sumber air siap minum dari sumber layak telah terkontaminasi bakteri *Escherichia coli* (SKA BPS, 2016). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012), jika terdapat bakteri koliform pada air minum maka dapat dipastikan bahwa konsentrasi residual klor pada air dari jaringan distribusi tersebut rendah atau kurang dari 0,2 mg/l.

Survei yang juga dilakukan oleh YLKI pada bulan Oktober 2016, dari 21 pelanggan PDAM Kota Yogyakarta yang dijadikan sampel, hanya 14,89% pelanggan yang memanfaatkan air PDAM sebagai sumber air minum sedangkan sisanya memanfaatkan air PDAM untuk Mandi, Cuci, dan Kakus (MCK) dan memasak (YLKI, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa masyarakat masih “takut” untuk menjadikan air PDAM sebagai sumber air minum apalagi untuk mengonsumsi langsung tanpa dimasak terlebih dahulu.

Di Surabaya sendiri hasil evaluasi kualitas air produksi PDAM di masing-masing instalasi pengolahan air pada tahun 2014-2016 telah memenuhi standar kualitas air siap minum berdasarkan permenkes. Namun, hasil evaluasi kualitas air produksi tidak dapat menjamin kualitas air pelanggan khususnya pelanggan yang berada jauh dari instalasi pengolahan air.

Sisa klor dan *Escherichia coli* merupakan standar dalam menentukan kualitas air di jaringan distribusi. Sisa klor berperan sebagai desinfektan terhadap *Escherichia coli* sehingga keberadaan sisa klor diperlukan untuk menjaga kualitas air perpipaan. Selain kualitas air perpipaan, debit air juga faktor penting dalam standar kuantitas air perpipaan. Kualitas dan kuantitas air dapat dipengaruhi oleh banyak faktor seperti debit air produksi, jarak distribusi, kecepatan air, *headloss mayor*, luas penampang pipa, dan diameter pipa.

Berdasarkan hal tersebut maka perlu adanya penelitian untuk memberikan gambaran secara sederhana dan sistematis mengenai faktor-faktor yang

mempengaruhi kualitas dan kuantitas air di jaringan distribusi PDAM melalui sebuah model dinamis. Gambaran sederhana dan sistematis tersebut dapat diperoleh dari pemodelan dinamis menggunakan STELLA 9.1.3 dengan beberapa simulasi skenario, yaitu skenario moderat (kondisi eksisting), skenario pesimis (kondisi ekstrim), dan skenario optimis (kondisi optimum). Berdasarkan hasil simulasi ketiga skenario model dinamis tersebut kemudian dilakukan pemilihan strategi ditinjau dari aspek lingkungan dan aspek finansial yang diharapkan dapat memperbaiki layanan kualitas dan kuantitas air yang diproduksi PDAM sehingga masyarakat selaku pelanggan dapat memperoleh kembali haknya sebagai warga negara dalam mengakses dan mengonsumsi air minum yang berkualitas dari pemerintah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya maka diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana model dinamis jaringan distribusi PDAM berdasarkan parameter sisa klor, *Escherichia coli*, dan debit air ?
2. Bagaimana hasil simulasi dari skenario yang diterapkan pada model dinamis jaringan distribusi PDAM ?
3. Apa strategi yang dapat diterapkan jika ditinjau dari aspek teknis, aspek lingkungan, dan aspek finansial ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari pelaksanaan penelitian ini, yaitu :

1. Membuat model jaringan distribusi PDAM dengan sistem dinamis.
2. Menentukan skenario moderat (kondisi eksisting), skenario pesimis (kondisi ekstrim), dan skenario optimis (kondisi optimum) dari jaringan distribusi PDAM.
3. Merekomendasikan strategi yang dapat diterapkan berdasarkan aspek teknis, aspek lingkungan, dan aspek finansial.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini, yaitu :

1. Memberikan informasi kepada masyarakat dan pihak-pihak terkait mengenai metode pemodelan dinamis dari jaringan distribusi PDAM.
2. Memberikan saran bagi pihak terkait mengenai skenario yang dapat diterapkan melalui pendekatan model dinamis sehingga kualitas air dapat ditingkatkan.
3. Memberikan rekomendasi strategi sebagai upaya meningkatkan kualitas dan kuantitas air jaringan distribusi PDAM.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini, yaitu:

1. Studi kasus pada penelitian ini adalah wilayah layanan IPAM Ngagel II PDAM Surya Sembada Kota Surabaya, yaitu Zona 3.
2. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah debit air produksi, debit air distribusi, jarak distribusi, kecepatan air, *headloss mayor*, luas penampang pipa, dan diameter pipa.
3. Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah persen kebocoran pipa.
4. Simulasi skenario moderat (kondisi eksisting) menggunakan asumsi kebocoran pipa sebesar 25% yang diperoleh dari hasil *trial and error* pada model untuk disesuaikan dengan kondisi riil sistem jaringan distribusi saat ini berdasarkan hasil pengukuran parameter di lapangan
5. Simulasi skenario pesimis (kondisi ekstrim) menggunakan asumsi 50% kebocoran pipa yang merupakan data tingkat kebocoran air tertinggi untuk rata-rata PDAM di Indonesia.
6. Simulasi skenario optimis (kondisi optimum) menggunakan asumsi 20% kebocoran pipa yang berdasarkan pada standar nasional indeks kebocoran pipa dari Dinas Pekerjaan Umum melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (KSNP-SPAM).

7. Parameter yang diuji adalah sisa klor, *Escherichia coli*, dan debit air.
8. Pengambilan sampel sebagai data primer dilakukan di kran air yang berada paling dekat dengan meteran air rumah warga.
9. Model dinamis yang digunakan dalam penelitian ini adalah STELLA 9.1.3.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Minum

Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 tahun 2010 Pasal 1 (1) menyebutkan “air minum adalah air yang melalui proses pengolahan atau tanpa proses pengolahan yang memenuhi syarat kesehatan dan dapat langsung diminum”. Adapun jenis air minum menurut Peraturan Menteri Kesehatan No. 907 tahun 2002 meliputi :

- 1) Air yang didistribusikan melalui jaringan perpipaan untuk keperluan rumah tangga,
- 2) Air yang didistribusikan melalui tangki air,
- 3) Air Minum dalam Kemasan (AMDK), dan
- 4) Air yang digunakan untuk produksi bahan makanan dan minuman yang disajikan kepada masyarakat.

2.2 Kualitas Air Minum

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 dan 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.

2.2.1. Parameter Mikrobiologi

Parameter mikrobiologi yang menjadi standar utama untuk kualitas air minum adalah total bakteri koliform dan *Escherichia coli*.

Menurut ketentuan WHO (2011), kualitas air ditentukan oleh kehadiran dan jumlah bakteri koliform dan *E.coli* didalamnya. Menurut APHA *et al.* (1998), bakteri koliform dideskripsikan sebagai berikut :

- Kelompok bakteri yang bersifat aerobik dan anaerobik fakultatif, termasuk bakteri gram negatif, tidak membentuk spora, berbentuk batang, dan mampu memfermentasikan laktosa dengan membentuk gas dan asam dalam waktu 48 jam pada suhu 35°C menggunakan teknik fermentasi multi tabung.
- Kelompok bakteri yang bersifat aerobik dan beberapa anaerobik fakultatif, termasuk bakteri gram negatif, tidak membentuk spora, berbentuk batang, dan dapat menghasilkan koloni berwarna merah dengan kilauan logam metalik dalam waktu 24 jam pada suhu 35°C di dalam endo-tipe medium yang berisi laktosa.

Menurut Asosiasi Standarisasi Perancis (AFNOR, 1990), bakteri koliform didefinisikan sebagai bakteri gram negatif berbentuk batang, *oxidase* negatif, bersifat aerobik dan anaerobik fakultatif yang dapat tumbuh dalam garam–garam empedu atau di tempat lain pada permukaan agen–agen aktif yang mempunyai efek analog sebagai penghambat pertumbuhan serta mampu memfermentasikan laktosa dengan membentuk gas dan asam dalam waktu 48 jam pada suhu 37°C. Jumlah koliform yang diperoleh pada suhu 37°C tersebut dinyatakan sebagai total bakteri koliform. Menurut Supardi dan Sukamto (1999), di Indonesia bakteri koliform didefinisikan sebagai suatu kelompok bakteri heterogen yang berbentuk batang pendek dengan ukuran sekitar 0,5–1,0 x 1,0–3,0 µm, termasuk bakteri gram negatif, bersifat non-motil ataupun motil, memiliki flagella peritrikus, yaitu flagella yang secara merata tersebar di seluruh permukaan sel, asporogenous, berfimbria ataupun tidak, dan berkapsul ataupun tidak.

Bakteri koliform sendiri bukan merupakan bakteri patogen, tetapi bakteri ini merupakan indikator dari pencemaran air oleh bakteri patogen (Soemirat, 2006). Adanya bakteri koliform pada makanan atau minuman menunjukkan

kemungkinan adanya mikroorganisme yang bersifat enteropatogenik dan atau toksigenik yang berbahaya bagi kesehatan manusia (Fardiaz, 1989). Pendeteksian bakteri koliform lebih murah, cepat, dan sederhana daripada mendeteksi bakteri patogenik lain. Pengujian bakteri koliform di air minum perpipaan dilakukan untuk mengetahui kualitas dari sistem distribusi air dan potensi adanya *biofilm* pada jaringan distribusi (WHO, 2011). Air dari sistem distribusi yang menunjukkan adanya bakteri koliform mengindikasikan bahwa pengolahan yang dilakukan tidak efektif, kurangnya kadar desinfektan, (McFeters *et al.*, 1986) dan adanya intrusi air yang terkontaminasi ke dalam sistem distribusi air (Clark *et al.*, 1996). Bakteri koliform yang masuk ke dalam sistem distribusi biasanya berasal dari pompa *booster* ataupun dari penghubung pipa-pipa utama jaringan distribusi. Selain itu, air juga dapat terkontaminasi bakteri koliform jika sistem perpipaan di kran rumah rusak atau kotor. Meskipun kontaminasi koliform yang berasal dari pipa distribusi dan pipa kran rumah cenderung sedikit, namun masuknya pencemar dari luar ke dalam sistem distribusi menunjukkan bahaya yang sama dengan distribusi air yang menggunakan sumber air baku tidak layak dan tidak terolah dengan baik (Edward *et al.*, 1987). Apabila air yang mengandung bakteri patogen ini terminum maka dapat menjadi penyakit seperti kholera, penyakit *typhoid*, penyakit *hepatitis infeksiosa*, dan penyakit *disentri basiler* (Fardiaz, 1989).

Tiga metode enumerasi koliform yang sering digunakan adalah metode inokulasi langsung pada medium agar, *Millipore membran-Filter*, dan MPN (*Most Probable Number*) dengan cara fermentasi tabung ganda menggunakan medium cair. Enumerasi koliform dengan metode filtrasi membran relatif lebih cepat namun, kelemahannya hanya bisa digunakan untuk contoh air dan tidak bisa diaplikasikan untuk contoh air dengan tingkat kekeruhan tinggi (Lynch dan Poole, 1979). Metode MPN dengan tabung ganda lebih baik dibandingkan dengan metode hitungan cawan karena lebih sensitif dan dapat mendeteksi koliform dalam jumlah yang sangat rendah (Fardiaz, 1989).

Bakteri yang termasuk kelompok bakteri koliform adalah *Escherichia coli* (Jay, 1992). *Escherichia coli* adalah salah satu bakteri yang termasuk kelompok bakteri koliform dan hidup secara normal di kotoran manusia atau hewan

sehingga disebut juga sebagai koliform fekal (Fardiaz, 1992). Diantara banyaknya jenis bakteri yang termasuk golongan bakteri koliform, *Escherichia coli* merupakan jenis bakteri yang paling umum digunakan sebagai indikator adanya pencemaran (Supardi, 1999). Bakteri ini pada umumnya mempunyai jumlah yang besar dalam tinja manusia sehingga pendeteksiannya dilakukan setelah beberapa kali dilakukan pengenceran (Sunarjo, 1994).

Escherichia coli merupakan bakteri yang bersifat gram negatif, berbentuk batang, dan tidak membentuk spora (Fardiaz, 1992). Kontaminasi *Escherichia coli* dapat menyebabkan infeksi pada usus (Jawetz *et al.*, 1994).

2.2.2 Parameter Kimiawi

Parameter kimiawi menyatakan kandungan zat-zat kimia dalam air minum yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Senyawa kimia berbahaya yang terlarut dalam air dapat berakibat fatal terhadap kesehatan jika kadar senyawa tersebut sangat berlebih atau hanya sedikit berlebih dalam air. Dalam penggunaan jangka panjang akan terjadi penimbunan zat-zat tersebut dan menimbulkan efek merugikan kesehatan (WHO, 2011). Parameter kimiawi yang menjadi standar kualitas air minum perpipaan adalah sisa klor.

Keberadaan sisa klor diperlukan dalam menjaga kualitas air perpipaan. Pemberian klorin dapat mengurangi tumbuhnya mikroba dan resiko terjadi kontaminasi dalam jaringan distribusi (Sugiarto *et al.*, 2014). Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 736/Menkes/Per/VI/2010 kadar sisa klor maksimal adalah 1 mg/l pada *outlet* reservoir dan 0,2 mg/l pada titik terjauh dari jaringan distribusi.

Sisa klor dengan kadar terlalu tinggi akan menyebabkan bau kaporit yang tajam dan membahayakan kesehatan manusia jika dikonsumsi. Salah satu efek samping dari proses klorinasi sendiri adalah terbentuknya *Trihalomethane* (THM) yang merupakan produk sisa klorinasi yang bersifat karsinogenik (Garcia *et al.*, 1997).

Efek yang terjadi apabila sisa klorin melebihi ambang batas adalah terjadi gangguan pernafasan berupa reaktivitas *bronchial* (*hyperresponsiveness*),

inflamasi, batuk-batuk, susah bernafas, sesak nafas, dan berkurangnya fungsi paru serta efek yang akan muncul pada gas klorin yang terlepas dari larutan hipoklorit terhirup (inhalasi) adalah iritasi pada rongga hidung dan sakit tenggorokan.

2.3 Jaringan Pipa Distribusi

Adapun jaringan perpipaan dalam sistem distribusi terdiri dari pipa primer, pipa sekunder, dan pipa tersier.

1. Pipa primer

Pipa primer atau disebut juga pipa induk merupakan pipa utama sistem distribusi air minum yang berfungsi mengalirkan air minum dari reservoir instalasi pengolahan menuju ke berbagai zona pelayanan. Pipa ini membentang dengan panjang tidak lebih dari 1 km dengan diameter 600 mm dan yang lebih besar.

2. Pipa Sekunder

Pipa sekunder memiliki diameter 200 mm – 500 mm dan tersambung langsung dengan pipa primer. Pipa ini biasanya terletak diantara dua atau empat blok di area pelayanan.

3. Pipa Tersier

Pipa tersier yang memiliki diameter 80 mm – 150 mm ini bersambungan langsung dengan pipa sekunder atau pipa primer yang melayani pipa servis.

4. Pipa Servis

Pipa servis merupakan pipa yang terhubung langsung dengan sambungan rumah dengan diameter < 100 mm.

Pada sistem jaringan distribusi terdapat beberapa faktor yang harus diperhatikan, yaitu kebocoran pipa, debit air, kecepatan air, jarak distribusi, luas penampang pipa, diameter pipa, dan *headloss mayor*.

1. Kebocoran Pipa

Salah satu faktor penyebab terkontaminasinya air dalam proses pengaliran adalah karena jaringan distribusi yang kurang layak dan kondisi perpipaan yang buruk sehingga menyebabkan tingginya angka kebocoran air secara teknis pada PDAM di Indonesia. Dalam laporan Perkembangan Pencapaian Tujuan Pembangunan Milenium Indonesia dipaparkan juga mengenai tingginya tingkat *un-accounted for water* yaitu tingkat kebocoran air. Data menunjukkan tingkat kebocoran air untuk PDAM seluruh Indonesia mencapai 22% - 50% dengan rata-rata 36% (Badan Pendukung Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, 2012). Angka ini jauh dari indeks kebocoran yang diizinkan menurut standar nasional yang dikeluarkan Departemen Pekerjaan Umum sebesar 20%.

Pada tahun 1991 IWSA (*International Water Supply Association*) melaporkan pada kebanyakan sistem distribusi air di dunia, kebocoran merupakan permasalahan utama. Persentase kehilangan air sangat besar terjadi saat proses distribusi air dari Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) ke konsumen. Jumlah air yang hilang atau *unaccounted* biasanya mencapai 20%-30% dari jumlah produksi air (Pal *et al.*, 2010). Hunaidi (2000), juga mengatakan pada sistem jaringan yang lebih tua, kehilangan air dapat mencapai 50%. Kerusakan pada pipa distribusi tidak hanya menyebabkan kehilangan air tetapi, juga menimbulkan risiko bagi kesehatan masyarakat, kerugian ekonomis akibat tingginya biaya dan energi yang terbuang pada instalasi pengolahan dan pemompaan dan resiko terhadap infrastruktur seperti pondasi bangunan dan jalan. Dengan demikian, pengurangan kebocoran air dari jaringan distribusi adalah strategi penting dalam peningkatan pemanfaatan air yang berkelanjutan (Pal *et al.*, 2010).

2. Debit Air

Debit air merupakan volume air per satuan waktu. Pada sistem jaringan distribusi perpipaan untuk menghitung debit air diperlukan data debit air produksi dan persentase kebocoran pipa. Debit air produksi berkaitan erat dengan kapasitas produksi dari sebuah instalasi pengolahan air. Untuk menghitung debit air distribusi perpipaan dapat digunakan persamaan 2.2 berikut:

$$Qd = Qp - (Qp \times n) \quad (2.1)$$

dengan:

Qd = debit air distribusi (m³/s)

Qp = debit air produksi (m³/s)

n = persentase kebocoran pipa (%)

3. Kecepatan Air

Dengan debit yang sama, air akan lebih cepat mengalir pada luas penampang yang kecil sehingga persamaannya sebagai berikut:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

dengan:

v = kecepatan air (m/s)

Q = debit air (m³/s)

A = luas penampang pipa (m²)

4. Luas Penampang Pipa

Pada fluida dinamis untuk menghitung luas penampnag pipa digunakan persamaan 2.3 berikut.

$$A = \pi \left(\frac{1}{2} d \right)^2 \quad (2.3)$$

dengan:

A = luas penampang pipa (m²)

Π = bilangan konstan, 3,14

d = diameter pipa (m)

5. *Headloss Mayor*

Headloss mayor merupakan kerugian gesek antara dinding pipa dengan aliran fluida tanpa adanya perubahan luas penampang di dalam pipa sehingga untuk menghitungnya digunakan persamaan 2.4 berikut:

$$hf = f \frac{L \times v^2}{D 2g} \quad (2.4)$$

dengan:

- hf = *headloss mayor* (m)
- f = koefisien gesekan
- L = panjang pipa (m)
- D = diameter pipa (m)
- v = kecepatan aliran dalam pipa (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)

2.4 **Pemodelan Sistem Dinamis**

Model merupakan representasi dari sistem nyata. Sebuah model dapat dikatakan baik apabila perilaku model tersebut dapat menyerupai sistem yang sebenarnya. Dalam membangun sebuah model akan sangat dipengaruhi oleh subjektivitas seseorang maka perlu adanya penyempurnaan yang dilakukan secara terus-menerus dengan menggali informasi dan potensi yang relevan (Winardi, 1989).

Menurut Barlas (1996), ada 4 (empat) keuntungan penggunaan model dalam penelitian dengan menggunakan pendekatan sistem, yaitu:

1. Memungkinkan melakukan penelitian yang bersifat lintas sektoral dengan ruang lingkup yang luas.
2. Dapat melakukan eksperimentasi terhadap sistem tanpa mengganggu (memberikan perlakuan) tertentu terhadap sistem.
3. Mampu menentukan tujuan aktivitas pengelolaan dan perbaikan terhadap sistem yang diteliti.

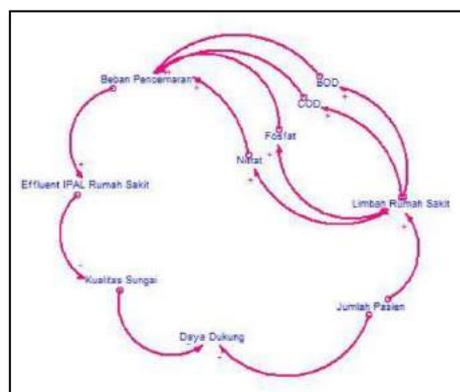
4. Dapat dipakai untuk menduga perilaku dan keadaan sistem pada masa yang akan datang.

Salah satu dasar utama dalam mengembangkan model adalah menemukan variabel-variabel yang penting dan tepat. Penemuan variabel tersebut sangat erat hubungannya dengan pengkajian hubungan-hubungan yang terdapat diantara variabel (Dimiyati dan Mudjiono, 2002).

Menurut Sterman (2000), adapun langkah-langkah dari proses pemodelan adalah sebagai berikut :

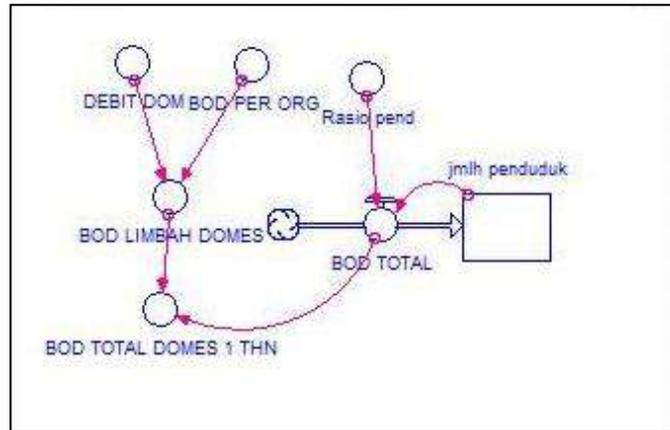
1. Perumusan masalah dan pemilihan batasan dunia nyata. Tahap ini meliputi kegiatan pemilihan tema yang akan dikaji, penentuan variabel kunci, rencana waktu untuk mempertimbangkan masa depan yang jadi pertimbangan serta seberapa jauh kejadian masa lalu untuk mempertimbangkan masa depan yang jadi pertimbangan serta seberapa jauh kejadian masa lalu dari akar masalah tersebut dan selanjutnya mendefinisikan masalah dinamisnya.
2. Formulasi hipotesis dinamis dengan menetapkan hipotesis berdasarkan pada teori perilaku terhadap masalah dan membangun peta struktur kausal melalui gambaran model mental pemodel dengan bantuan alat-alat seperti *causal loop diagram* dan *stock flow diagram*.

Secara sederhana pengembangan model dimulai dari konseptualisasi sistem yang dilakukan melalui pembuatan model konseptual yang digambarkan melalui *causal loop diagram* seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Contoh *Causal Loop Diagram* (Data Pribadi, 2017)

Konseptualisasi sistem digunakan untuk menggambarkan secara umum mengenai simulasi sistem dinamis yang akan dilakukan. Selanjutnya, model konseptual diterjemahkan menjadi model sistem dinamis melalui *stock and flow diagram* seperti pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Contoh *Stock and Flow Diagram* (Data Pribadi, 2017)

Formulasi pada model sendiri dapat dilakukan dengan cara memahami dan menguji konsistensi model apakah sudah sesuai dengan tujuan dan batasan yang dibuat. Setelah model dibuat maka selanjutnya dilakukan tahap verifikasi. Pada tahap verifikasi dilakukan pengecekan terhadap model yang telah dibuat, apakah model sudah sesuai dengan yang diinginkan, masuk akal, dan apakah formulasi maupun satuannya sudah konsisten. Selanjutnya, model sistem disimulasikan kemudian validasi hasil simulasi model dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dibuat benar-benar dapat merepresentasikan kondisi riil sistem.

Secara umum sistem dinamis merupakan pemodelan dan simulasi komputer untuk mempelajari dan mengelola sistem umpan balik yang rumit (*complex feedback systems*), seperti bisnis, sistem lingkungan, dan sistem social (Sterman 2000). Model dinamika sistem sendiri dibentuk karena adanya hubungan sebab-akibat (*causal*) yang mempengaruhi struktur di dalamnya baik secara langsung antar dua struktur maupun akibat dari berbagai hubungan yang terjadi pada sejumlah struktur hingga membentuk umpan-balik (*causal loop*). Struktur umpan-balik ini merupakan blok pembentuk model yang diungkapkan melalui lingkaran-lingkaran hubungan sebab-akibat dari variabel-variabel yang melingkar secara

tertutup. Konsep utama sistem dinamis adalah pemahaman tentang bagaimana semua obyek dalam suatu sistem saling berinteraksi satu dengan yang lain yang diabstraksikan ke model yang lebih eksplisit.

Permasalahan yang dapat dengan tepat dimodelkan menggunakan metodologi sistem dinamis adalah masalah yang mempunyai sifat dinamis (berubah terhadap waktu) dan struktur fenomenanya mengandung paling sedikit satu struktur umpan-balik (*feedback structure*). Penggunaan metodologi sistem dinamik yang dimodelkan adalah struktur informasi sistem yang didalamnya terdapat sumber-sumber informasi dan jaringan aliran informasi yang menghubungkan keduanya (Tasrif, 2007).

2.5 Program STELLA

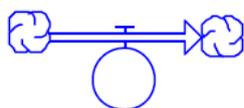
Stella merupakan bahasa pemrograman jenis interpreter berbasis grafis. Pengguna Stella dapat dengan mudah menyusun model dengan merangkaikan bentuk-bentuk geometris seperti bujursangkar, lingkaran dan panah yang dikenal sebagai *Building Blocks*. Berikut beberapa alat penyusun model yang sering digunakan dalam Stella :

1. *Stock*



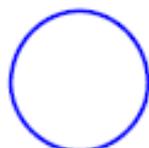
Stock merupakan hasil suatu akumulasi. Fungsinya untuk menyimpan informasi berupa nilai suatu parameter yang masuk ke dalamnya.

2. *Flows*



Flow berfungsi untuk menambah atau mengurangi *stock*. Arah anak panah menunjukkan arah aliran tersebut. Aliran bisa satu arah maupun dua arah.

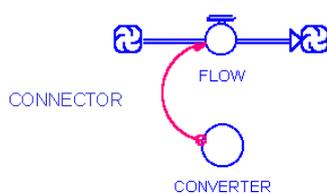
3. Converter



Converter mempunyai fungsi yang luas, yaitu dapat digunakan untuk menyimpan konstanta, *input* bagi suatu

persamaan, melakukan kalkulasi dari berbagai *input* lainnya atau menyimpan data dalam bentuk grafis (tabulasi x dan y). Namun, secara umum converter berfungsi untuk mengubah suatu *input* menjadi *output*.

4. Connector



Connector berfungsi untuk menghubungkan elemen-elemen dari suatu model.

2.6 Analisis Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan finansial adalah landasan untuk menentukan sumber daya finansial yang diperlukan untuk tingkat kegiatan tertentu dan laba yang diharapkan. Kebutuhan finansial dan pengembalian (*return*) bisa sangat berbeda, tergantung pada pemilihan alternatif yang ada bagi sebagian besar usaha (Lubis, 2013).

Usaha jangka panjang adalah usaha yang telah menjual hasil produksi atau jasa pada konsumennya sudah lebih dari satu periode. Usaha jangka panjang diterapkan pada kreditur yang menjalankan usahanya lebih dari satu tahun. Indikator dari usaha jangka panjang dalam menganalisis kelayakan investasi dari aspek finansial, yaitu:

1. NPV (*Net Present Value*)

Net Present Value (NPV) merupakan hasil keuntungan bersih (*net benefit*) maksimal yang diperoleh dengan sebuah investasi modal usaha dengan kriteria:

$NPV > 0$, maka usaha layak dibangun

$NPV = 0$, maka usaha pengembalian sama dengan investasi

$NPV < 0$, maka usaha tidak layak dibangun

NPV dapat pula diartikan dengan total modal bersih yang didapatkan dengan ditambahkan laba yang bersih sehingga NPV diartikan sebagai analisa

keuangan yang digunakan untuk menentukan layak tidaknya usaha yang dibangun berdasarkan nilai sekarang dari aliran kas bersih yang akan diterima dibandingkan dengan nilai sekarang dari modal investasi yang dikeluarkan. Berikut Persamaan 2.5 yang dapat digunakan untuk menghitung NPV.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(C)t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{(Co)t}{(1+i)^t} \quad (2.5)$$

dengan:

NPV	= <i>net present value</i>
$(C)t$	= aliran kas masuk tahun ke t
$(Co)t$	= aliran kas keluar tahun ke t
N	= umur ekonomis proyek
i	= suku bunga yang digunakan
t	= tahun (waktu)

2. BCR (*Benefit Cost Ratio*)

Penggunaan *Benefit Cost Ratio* (BCR) sangat sering digunakan dalam mengevaluasi usaha - usaha untuk kepentingan umum dan bukan kepentingan finansial perusahaan dalam hal ini penekanannya ditujukan pada manfaat (*benefit*) (Soeharto,1997). Berikut Persamaan 2.6 yang digunakan untuk menghitung *Benefit Cost Ratio*.

$$BCR = \frac{(PV)B}{(PC)C} \quad (2.6)$$

dengan:

BCR	= perbandingan manfaat terhadap biaya
$(PC)B$	= nilai sekarang manfaat
$(PC)C$	= nilai sekarang biaya

Adapun ukuran kelayakan dari BCR, yaitu:

$BCR > 1$, maka usaha layak dikerjakan

BCR < 1, maka usaha tidak layak digunakan

3. IRR (*Internal Rate of Return*)

Internal Rate of Return adalah arus pengembalian yang menghasilkan NPV aliran kas masuk dikurangi NPV aliran kas keluar. Pada metode NPV dilakukan dengan menentukan terlebih dahulu besar arus pengembalian kemudian dihitung nilai sekarang dari kas keluar dan masuk (Soeharto, 1997). Adapun Persamaan 2.7 merupakan persamaan untuk menghitung nilai IRR.

$$IRR = r1 + (r2 - r1) \times \frac{NPV1}{NPV1 - NPV2} \quad (2.7)$$

dengan:

IRR	= <i>internal rate of return</i>
r1	= <i>internal rate</i> untuk penetapan ke-1
r2	= <i>internal rate</i> untuk penetapan ke-2
NPV1	= <i>net present value</i> dari IR 1
NPV2	= <i>net present value</i> dari IR 2

Adapun ukuran kelayakan yang digunakan oleh IRR adalah:

IRR > arus pengembalian yang diinginkan maka usaha diterima

IRR < arus pengembalian yang diinginkan maka usaha ditolak

4. PP (*Payback Periode*)

Periode pengembalian atau *payback periode* adalah jangka waktu yang diperlukan untuk pengembalian modal investasi, dihitung dari kas bersih (Soeharto,1997). Persamaan 2.8 berikut menunjukkan persamaan untuk mendapatkan nilai PP.

$$PP = (n - 1) + \left[Cf - \sum_n^{n-1} An \left[\frac{1}{An} \right] \right] \quad (2.8)$$

dengan:

PP	= jangka waktu pengembalian
Cf	= biaya pertama
An	= aliran kas bersih pada tahun ke-n
n	= tahun pengembalian

2.7 Gambaran Umum PDAM Surya Sembada Kota Surabaya

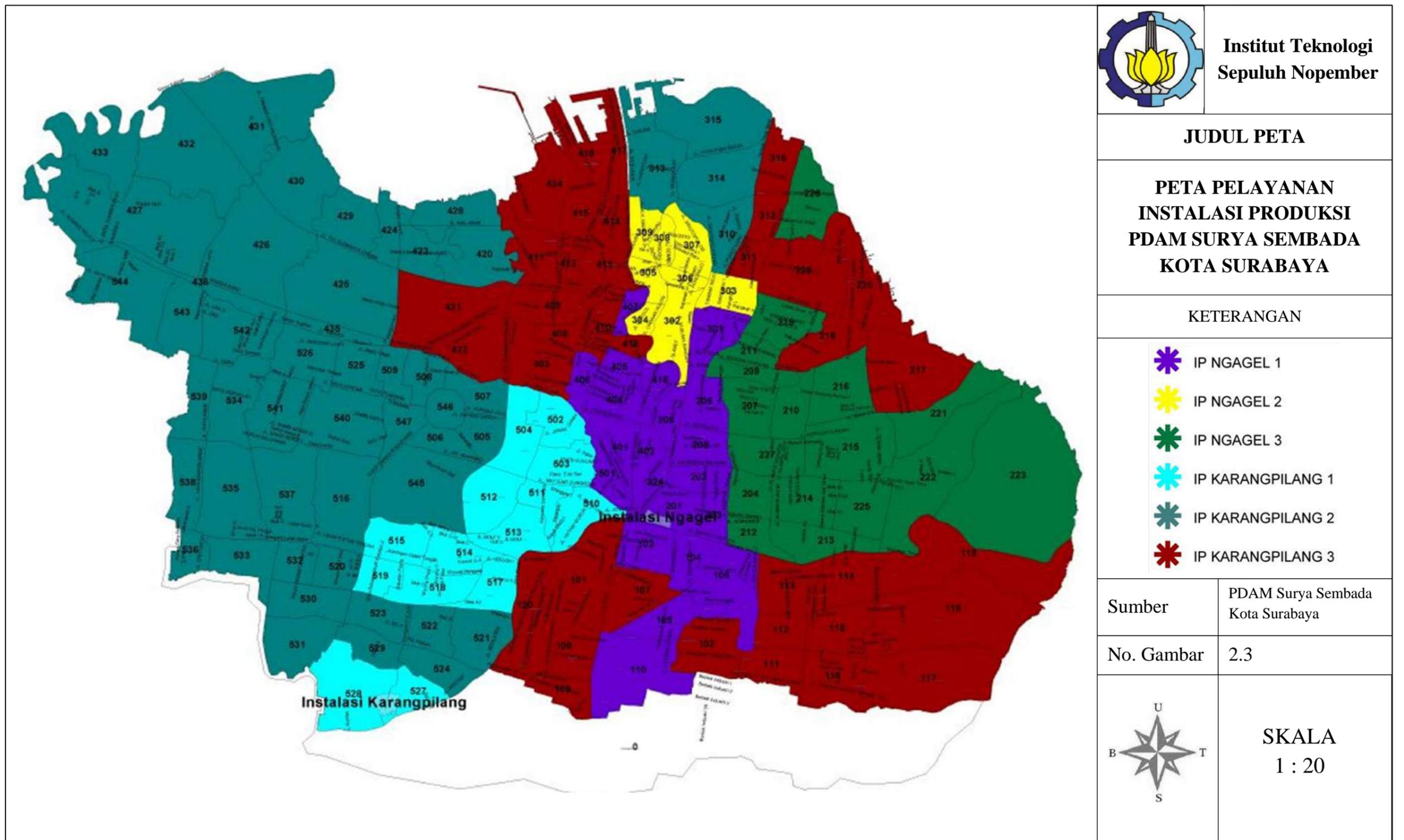
PDAM Surya Sembada Kota Surabaya memiliki wilayah pelayanan yang tidak hanya terbatas pada daerah administratif Kota Surabaya saja, melainkan juga masyarakat daerah Kabupaten Pasuruan, Sidoarjo, dan Gresik. Pada tahun 2010 cakupan pelayanan PDAM Surya Sembada untuk wilayah Kota Surabaya mencapai 79,41% dari total penduduk Kota Surabaya dan terus mengalami peningkatan hingga pada tahun 2016 mencapai 95,51% dengan total sambungan rumah sekitar 547.819 SR.

PDAM Surya Sembada Kota Surabaya sendiri mengalirkan air produksi ke wilayah pelayanan yang telah terbagi menjadi 5 (lima) zona pelayanan, yaitu zona I, zona II, zona III, zona IV, dan zona V. Pembagian zona pelayanan tersebut digunakan sebagai pedoman untuk mempermudah dalam pengelolaan wilayah layanan. Ke-5 zona layanan tersebut dilayani oleh 6 (enam) instalasi pengolahan air milik PDAM Surya Sembada Kota Surabaya, yaitu IPAM Ngagel I dengan kapasitas produksi 1.800 liter/detik, IPAM Ngagel II dengan kapasitas produksi 1000 liter/detik, IPAM Ngagel III dengan kapasitas produksi 1.750 liter/detik, IPAM Karangpilang I dengan kapasitas produksi 1.450 liter/detik, IPAM Karangpilang II dengan kapasitas produksi 2.750 liter/detik, dan IPAM Karangpilang III dengan kapasitas produksi 2.000 liter/detik.

IPAM Ngagel II melayani Zona III dengan subzona 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, dan 309 dengan luas sekitar 7,077 km². Wilayah layanan IPAM Ngagel II mencakup sebagian Kecamatan Genteng, sebagian Kecamatan Pabean Cantian, sebagian Kecamatan Semampir, sebagian Kecamatan Tambaksari, dan sebagian besar wilayah Kecamatan Simokerto.

Kualitas air produksi IPAM Ngagel II seperti yang ditunjukkan oleh Lampiran 1 telah menunjukkan kualitas air yang sesuai dengan standar namun, ketika memasuki jaringan distribusi kualitas air mengalami penurunan oleh karena beberapa faktor seperti kebocoran pipa, jarak distribusi, luas penampang pipa, dan diameter pipa. Berdasarkan data PDAM (2016), pelanggan yang berada di sub zona 306 (Jl. Gembong 5/7A) kadar sisa klor telah habis sehingga meningkatkan jumlah *Escherichia coli* sebanyak 23 MPN/100 ml sampel.

Adapun peta pelayanan instalasi produksi PDAM Surya Sembada Kota Surabaya dapat dilihat pada Gambar 2.3 dengan wilayah layanan IPAM Ngagel II berwarna kuning.



Gambar 2.3 Peta Pelayanan Instalasi Produksi PDAM Surya Sembada Kota Surabaya (PDAM Surya Sembada Kota Surabaya, 2017)

2.5 Penelitian Terdahulu

Menurut Afrianita *et al.* (2016) dalam penelitiannya mengenai kadar sisa klor di jaringan distribusi air minum dengan studi kasus PDAM Kota Padang, jarak distribusi merupakan faktor dominan yang mempengaruhi keberadaan kadar sisa klor dalam jaringan distribusi air minum. Semakin jauh jarak distribusi maka kadar sisa klor akan semakin berkurang dengan nilai korelasi 0,634 (kuat). Selain itu, pH juga memiliki korelasi yang kuat terhadap sisa klor dengan nilai korelasi 0,649 (kuat) sedangkan faktor lain yang juga dapat mempengaruhi kadar sisa klor, yaitu jenis pipa, umur pipa, kondisi pipa yang rusak atau bocor, hidrolika pipa, kondisi lingkungan di sekitar pipa distribusi, dan interkoneksi jaringan distribusi.

Penelitian yang dilakukan oleh Syahputra (2012) dalam penelitiannya mengenai analisa sisa klor di jaringan distribusi PDAM Kota Semarang menunjukkan bahwa antara jarak reservoir ke konsumen terhadap konsentrasi sisa klor memiliki hubungan negatif dimana semakin bertambah jarak reservoir ke konsumen maka konsentrasi sisa klor akan semakin berkurang. Setiap jarak reservoir ke konsumen bertambah 1 meter maka konsentrasi sisa klor akan berkurang 0,002 mg/l sehingga sisa klor akan habis pada jarak 585 meter dari reservoir. Hubungan ini mempunyai korelasi yang tidak kuat, yaitu 0,677 artinya ada faktor-faktor lain yang juga ikut mempengaruhi. Faktor-faktor tersebut diantaranya debit aliran, kecepatan aliran, diameter pipa dan koefisien kekasaran dinding pipa.

Menurut Anggraini *et al* (2017) berdasarkan hasil evaluasi dan pemetaan pola jaringan sisa klor pada jaringan distribusi PDAM Banjar, konsentrasi sisa klor di jaringan distribusi berpengaruh pada jarak dari resevoir hingga ke konsumen dimana pada hasil uji regresi linear logaritmik didapatkan nilai $R^2 = 0,6916$. Semakin jauh jarak yang ditempuh oleh air maka konsentrasi sisa klornya akan semakin menurun.

Penelitian yang dilakukan oleh Andhika *et al.* (2013) menunjukkan bahwa terjadi penurunan kandungan bakteri *Escherichia coli* di air yang diinjeksikan klor dimana jumlah *Escherichia coli* sebelum diinjeksi klor mencapai 923 MPN/100 ml sampel sedangkan ketika klor diinjeksikan, jumlah *Escherichia coli* berkurang signifikan hingga mencapai 7 MPN/100 ml sampel. Hal ini sesuai dengan

penelitian yang dilakukan oleh Retnowati (2015) yang menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara kadar klor dengan kadar bakteri *Escherichia coli* dimana diperoleh nilai koefisien korelasi $r = -0,484$. Selain itu, penelitian tersebut juga menyimpulkan bahwa terdapat korelasi antara kadar klor dengan panjang pipa air minum dengan koefisien korelasi $r = -0,255$.

Menurut Khairunnisa (2012) penentuan koliform fekal menjadi indikator pencemaran dikarenakan jumlah koloninya pasti berkorelasi positif dengan keberadaan bakteri patogen. Semakin sedikit kandungan koliform maka kualitas air akan semakin baik.

Penelitian yang dilakukan oleh Asryadin *et al* (2012) menunjukkan bahwa ada pengaruh jarak distribusi air dari unit pengolahan terhadap pH air dimana berdasarkan hasil uji analisis regresi linier diperoleh prediksi nilai konstan pH 7,517 dengan prediksi peningkatan sebesar 0,164 tiap perlakuan. Selain itu, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa kadar sisa klor mengalami penurunan seiring semakin jauhnya jarak distribusi hingga diperoleh sisa klor $< 0,2$ mg/l pada jarak 16 km dan 20 km.

Penelitian yang dilakukan oleh Sugiarti *et al* (2014) menunjukkan bahwa terdapat pengaruh jarak pengaliran terhadap koloni koliform dengan $r = 0,726$ (kuat) pada jarak 0 km - 6 km serta pengaruh jarak pengaliran, pH, dan tekanan terhadap koloni koliform $R = 0,301$ (rendah) pada jarak 8 km - 20 km. Sedangkan pengaruh jarak pengaliran dan suhu terhadap sisa klorin sebesar $r = 0,272$ (rendah) pada jarak 0 km hingga 6 km; dan pengaruh jarak pengaliran, pH, dan tekanan terhadap sisa klorin $r = 0,364$ (rendah) pada jarak 8 km hingga 20 km.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

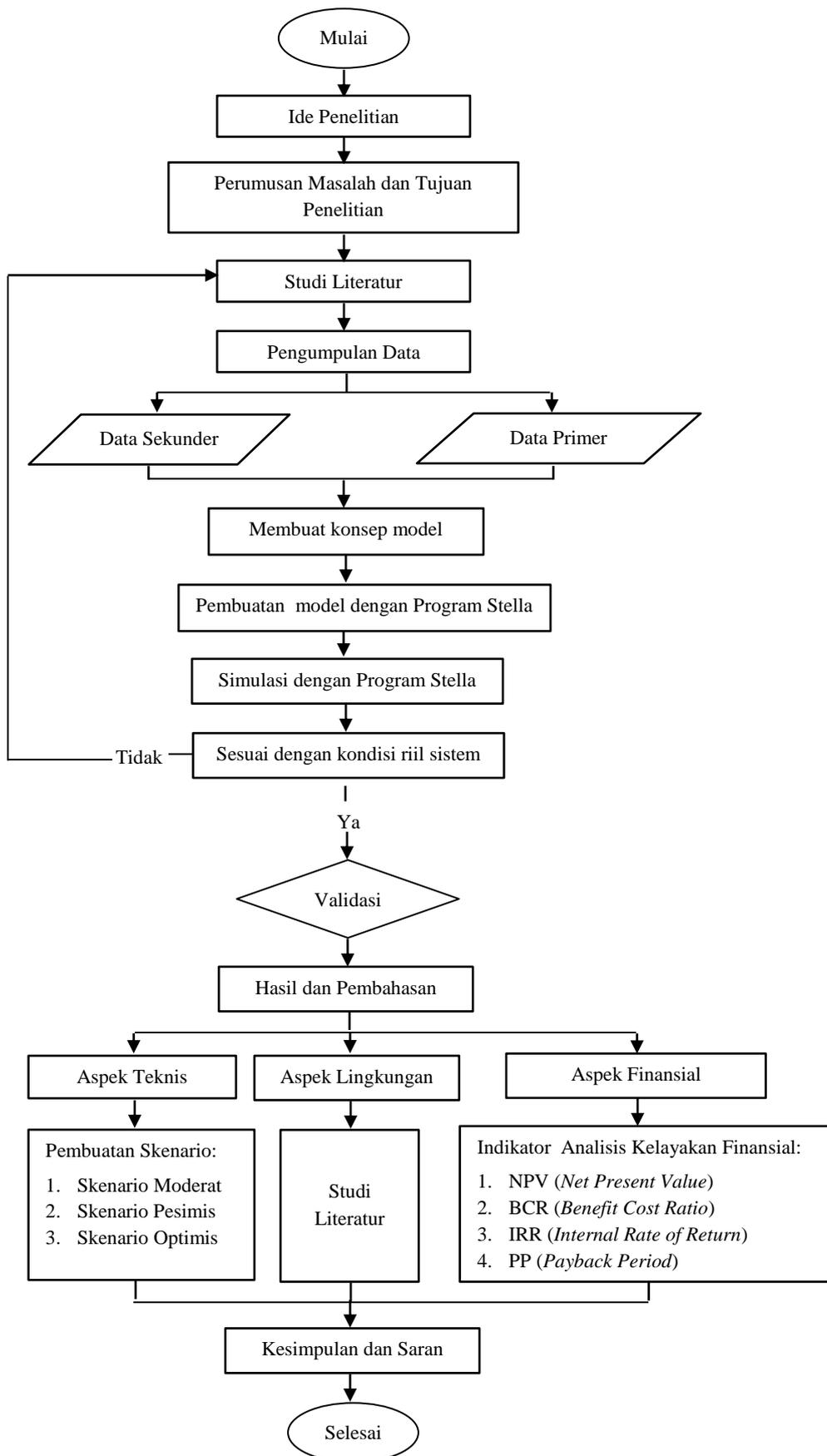
Adapun tahapan penelitian dalam pemodelan jaringan distribusi PDAM dengan sistem dinamis dapat dirumuskan dalam diagram seperti pada Gambar 3.1.

3.2 Kerangka Penelitian

Adapun kerangka penelitian ini dapat dijabarkan berdasarkan beberapa tahapan berikut:

3.2.1 Ide Penelitian

Hasil evaluasi kualitas air produksi tahun 2014-2016 di instalasi pengolahan air milik PDAM Surya Sembada, yaitu Instalasi Ngagel I, Ngagel II, Ngagel III, Karangpilang I, Karangpilang II, dan Karangpilang III menunjukkan kualitas air layak minum berdasarkan Permenkes No. 492 tahun 2010. Namun, kenyataannya terjadi penurunan kualitas air yang disebabkan semakin jauhnya jarak distribusi dari instalasi pengolahan padahal pemerintah telah mencanangkan 100% akses layanan air siap minum di Indonesia yang tertuang dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) periode 2015-2019. Pasal 2 sebagaimana tercantum dalam Permenkes No. 492 tahun 2010 menyebutkan “Setiap penyelenggara air minum wajib menjamin air minum yang diproduksinya aman bagi kesehatan”. Permenkes No. 736 tahun 2010 mensyaratkan pada titik terjauh dari jaringan distribusi paling tidak mengandung kadar sisa klor sebesar 0,2 mg/l untuk menghindari kontaminasi mikroorganisme. Oleh karena itu, dilakukan pemodelan dinamis yang diharapkan nantinya dapat memprediksi kondisi jaringan distribusi sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam perbaikan sistem jaringan distribusi PDAM di Indonesia.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dalam rangka mendukung penelitian dari awal hingga penyusunan laporan, yaitu untuk memperoleh informasi mengenai penelitian terdahulu serta mendapatkan dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini sehingga dapat menjadi acuan dalam melaksanakan analisa dan pembahasan. Studi literatur dalam penelitian ini menggunakan jurnal internasional, jurnal nasional, buku teks, tesis, dan tugas akhir.

3.2.3 Pengumpulan Data

Pembuatan model dinamis dengan STELLA 9.1.3 pada penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder.

A. Data Primer

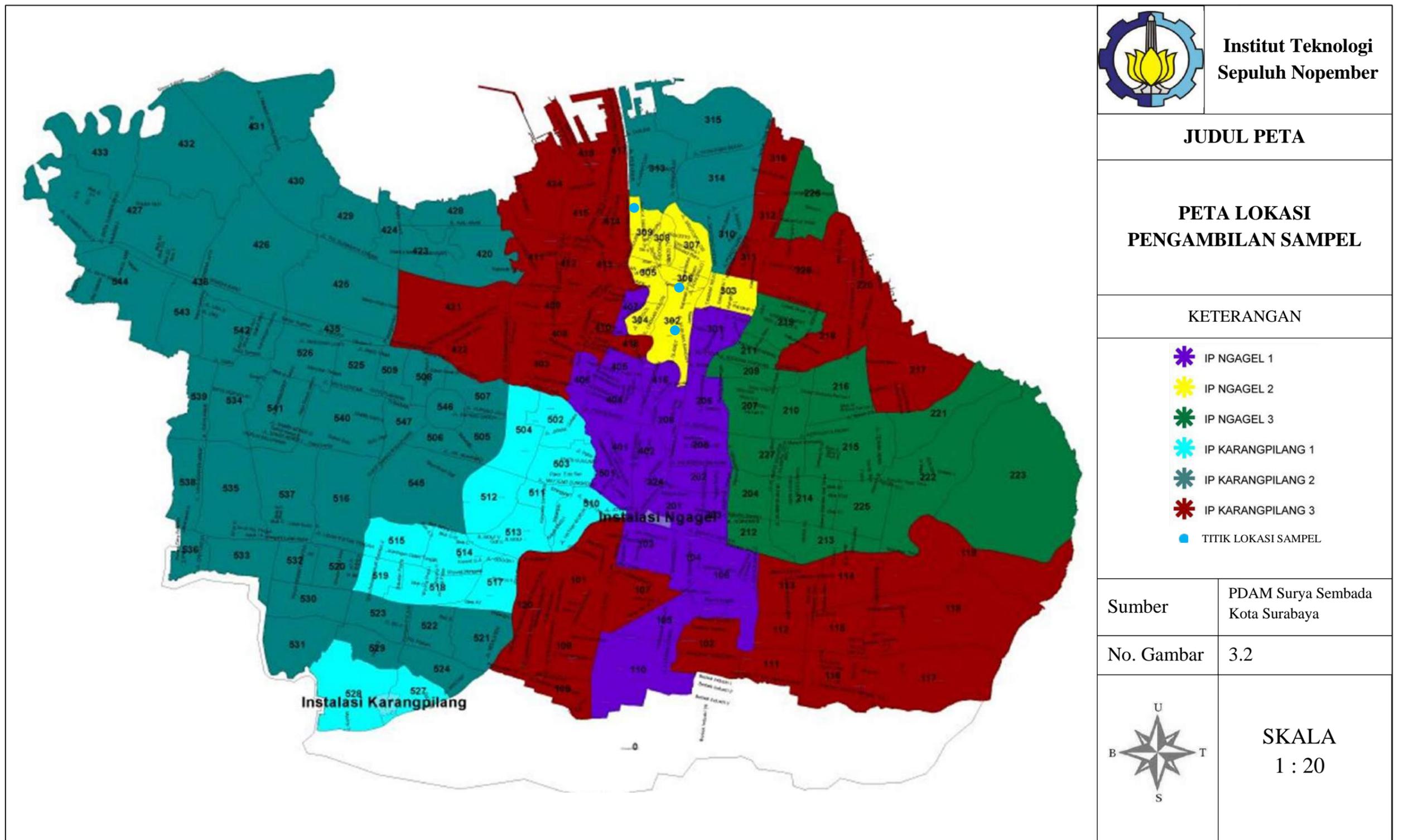
Data primer yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu hasil pengujian kualitas air pelanggan berupa pH, sisa klor, *Escherichia coli*, dan debit air.

1. Pengambilan Sampel

Lokasi dalam penelitian ini adalah sub zona 3 yang dilayani oleh IPAM Ngagel II karena IPAM Ngagel II ini merupakan instalasi yang paling sedikit wilayah pelayanannya, yaitu hanya sekitar 7,077 km². Namun, mencakup wilayah dengan kepadatan penduduk yang tinggi di Surabaya, yaitu Kecamatan Simokerto.

Sebanyak 3 (tiga) titik sampel yang diharapkan dapat mewakili wilayah pelayanan IPAM Ngagel II, yaitu titik sampel yang berada pada zona 302 sebagai wilayah pelayanan yang terdekat dari instalasi pengolahan (5 km), titik sampel yang berada pada zona 306 sebagai wilayah yang berada di tengah wilayah pelayanan (7 km), dan titik sampel yang berada pada zona 309 sebagai wilayah yang berada paling jauh dari instalasi pengolahan (10 km). Lokasi titik sampel dapat dilihat pada Gambar 3.2 dimana wilayah pelayanan IPAM Ngagel II berwarna kuning.

Pengambilan sampel dilakukan selama 5 hari berturut-turut pada saat jam puncak. Pengukuran debit air dan sisa klor dilakukan langsung di lokasi pengambilan sampel sedangkan pengukuran *Escherichia coli* dilakukan di Laboratorium Pengolahan Sampah dan Limbah B3 Jurusan Teknik Lingkungan ITS.



Gambar 3.2 Peta Lokasi Pengambilan Sampel (Hasil Analisis, 2017)

1. Metode Analisa Sampel

Menurut Peraturan Menteri Kesehatan No. 736 tahun 2010 tentang pengawasan kualitas air minum, pengujian sampel air minum, dengan prosedur pengujian terdapat pada Lampiran 2, dapat dilakukan di lapangan dan juga di laboratorium. Metode analisa sampel mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) atau metode yang telah ditetapkan oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN) ataupun metode lain berdasarkan referensi yang dapat dipertanggungjawabkan keakuratan hasil pengujiannya. Adapun parameter kualitas air yang akan dianalisa dan metode analisa yang akan digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Metode Analisa Sampel

No.	Parameter	Metode Analisa	Referensi
Fisik			
1.	pH	pH meter	SNI 06-6989.11-2004
Mikrobiologi			
2.	<i>Escherichia coli</i>	Fermentasi Multi Tabung	SNI 01-2332.1-2006
Kimia Anorganik			
3.	Sisa Klor	Iodometri	SNI 06-6989.22-2004

A. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini berupa:

1. Peta wilayah pelayanan PDAM,
2. Data debit air produksi IPAM Ngagel II,
3. Data asumsi kebocoran pipa IPAM Ngagel II,
4. Data keuangan PDAM Surya Sembada Kota Surabaya,
5. Data-data lain yang nantinya menunjang penelitian.

3.2.4 Pembuatan Struktur Model

Pembuatan struktur model bertujuan untuk memberikan gambaran sistem secara umum sebelum simulasi dilakukan. Elemen pada model disusun

berdasarkan pada proses dan tujuan akhir dari simulasi model. Elemen pada model memuat variabel-variabel yang berpengaruh terhadap sistem yang diamati, yaitu kualitas air pelanggan di jaringan distribusi terjauh.

Adapun hasil dari simulasi model diharapkan dapat digunakan sebagai pertimbangan nilai kualitas air yang sesuai dengan persyaratan kualitas air minum.

3.2.5 Simulasi dengan Program STELLA 9.1.3

Simulasi model dilakukan untuk melihat bagaimana sebuah sistem berjalan. Simulasi dilakukan setelah elemen model telah dimasukkan nilainya sehingga setelah proses *running* berhasil dilakukan maka diperoleh elemen hasil yang diinginkan. *Output* inilah yang nantinya akan dibuatkan skenario pemodelan yang tepat guna memecahkan permasalahan yang ada di jaringan distribusi.

3.2.6 Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi dan validasi model bertujuan untuk mengetahui apakah model yang dibuat masih terdapat *error* sehingga belum dapat dilakukan *running* model.

Verifikasi model ini dilakukan untuk memeriksa *error* pada model dan meyakinkan bahwa model telah berfungsi sesuai dengan logika pada obyek sistem. Verifikasi ini juga diperlukan untuk memeriksa formulasi, model, dan memeriksa satuan (unit) variabel. Jika tidak terdapat *error* maka dapat dikatakan bahwa model telah terverifikasi.

Validasi dilakukan untuk meyakinkan bahwa model telah memenuhi tujuan pembuatan model secara menyeluruh dan dapat mempresentasikan sistem nyata.

Proses validasi dalam model dilakukan dengan 2 (dua) metode, yaitu metode *white box* dan *black box*. Metode *white box* dilakukan dengan memasukkan semua variabel serta keterkaitan antar variabel di dalam model yang didapatkan dari literatur dan pendapat ahli (*expert*) dalam bidang penelitian ini. Validasi dengan metode *black box* dilakukan dengan membandingkan rata-rata nilai aktual dengan nilai hasil simulasi.

3.2.7 Hasil dan Pembahasan

Pada hasil dan pembahasan akan dijabarkan mengenai hasil penelitian berdasarkan 3 (tiga) pilihan aspek, yaitu aspek teknis, aspek lingkungan, dan aspek finansial.

A. Aspek Teknis

Aspek teknis pada penelitian ini adalah simulasi model dengan menerapkan 3 (tiga) jenis skenario.

Penerapan skenario ini dilakukan dengan mengubah kondisi pada model sehingga akan menghasilkan *output* yang lebih baik dibandingkan kondisi moderat (eksisting). Nantinya pengembangan model akan dibandingkan dengan *output* eksisting untuk kemudian dilakukan identifikasi apakah skenario tersebut menghasilkan perubahan yang signifikan atau tidak.

Pada penelitian ini skenario yang diterapkan pada model jaringan distribusi adalah skenario dengan variabel kontrol persen kebocoran pipa. Persen kebocoran pipa dipilih sebagai variabel kontrol 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. Saat ini kebocoran pipa masih belum dapat diprediksi secara pasti tingkat keberadaannya sehingga diperlukan asumsi untuk setiap sistem jaringan distribusi. Dengan asumsi tersebut yang dimasukkan ke dalam skenario, penelitian ini diharapkan akan dapat memprediksi kualitas air ketika sistem jaringan distribusi berada pada kondisi ekstrim dan kondisi optimum.

Simulasi model ini berdasarkan 3 (tiga) jenis skenario utama, yaitu skenario moderat, skenario pesimis, dan skenario optimis. Setiap skenario tersebut akan dibagi menjadi 3 (tiga) model yang merupakan 3 (tiga) titik sampel dari wilayah pelayanan IPAM Ngagel II, yaitu model untuk titik sampel yang berada pada jarak 5 km sebagai perwakilan dari zona 302 yang merupakan wilayah terdekat dari reservoir, model untuk titik sampel yang berada pada jarak 7 km sebagai perwakilan dari zona 306 yang merupakan zona pertengahan dari wilayah pelayanan IPAM Ngagel II, dan model untuk titik sampel yang berada pada jarak

10 km sebagai perwakilan dari zona 309 yang merupakan wilayah terjauh dari reservoir.

Pada masing-masing model untuk setiap jenis skenario hasil simulasi berupa prediksi kualitas air berdasarkan parameter sisa klor dan *Escherichia coli* serta prediksi kuantitas air berdasarkan debit air pada jaringan distribusi. Prediksi dilakukan untuk 9 (sembilan) hari ke depan.

1) Skenario Moderat (Kondisi Eksisting)

Pada skenario ini persen kebocoran pipa yang digunakan sebesar 25%. Besaran persen kebocoran pipa diperoleh dari hasil *trial and error* yang dilakukan pada model untuk disesuaikan dengan kondisi riil sistem jaringan distribusi saat ini berdasarkan hasil pengukuran parameter di lapangan.

2) Skenario Pesimis (Kondisi Ekstrim)

Skenario ini akan menerapkan asumsi 50% kebocoran pipa jaringan distribusi. Hal ini berdasarkan pada data tingkat kebocoran air tertinggi untuk rata-rata PDAM di Indonesia.

3) Skenario Optimis (Kondisi Optimum)

Skenario optimis akan menerapkan asumsi 20% kebocoran pipa di jaringan distribusi. Hal ini berdasarkan pada standar nasional untuk indeks kebocoran pipa yang dikeluarkan oleh Dinas Pekerjaan Umum melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (KSNP-SPAM).

B. Aspek Lingkungan

Aspek lingkungan dianalisa untuk menentukan strategi yang tepat yang bertujuan untuk peningkatan kualitas dan kuantitas air distribusi IPAM Ngagel II yang memenuhi daya dukung lingkungan.

Pemilihan strategi dalam aspek lingkungan ini berdasarkan studi literatur yang dilakukan sehingga menghasilkan 2 (dua) strategi yang diharapkan dapat

mengoptimalkan kualitas dan kuantitas (debit air distribusi) IPAM Ngagel II. Adapun strategi tersebut dijelaskan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Strategi, Sasaran, dan Langkah Operasional dalam Kajian Aspek Lingkungan

Strategi	Sasaran	Langkah Operasional
Peningkatan Kualitas dan Debit Air Produksi	a. Pemeliharaan kualitas air produksi b. Pengembangan sumber-sumber air baku	a. Evaluasi kualitas air produksi b. Investasi dalam pengembangan sumber air baku
Peningkatan Kualitas Air di Pelanggan	a. Pemeliharaan jaringan distribusi b. Pemeliharaan kualitas air di jaringan distribusi	a. Perawatan sambungan pipa b. Pembangunan pos desinfeksi

Sumber: Hasil Analisa (2017)

C. Aspek Finansial

Aspek finansial dilakukan dengan menganalisa kelayakan investasi berdasarkan pada perkiraan pendapatan, biaya konstruksi atau investasi, biaya operasional dan pemeliharaan serta biaya investasi setelah operasional dalam rangka peningkatan kualitas dan debit air distribusi IPAM Ngagel II. Adapun untuk menganalisis investasi dari aspek finansial dapat dilakukan dengan metode berikut.

1. *Net Present Value* (NPV)

NPV merupakan arus kas yang diperkirakan pada masa yang akan datang yang didiskonkan pada waktu sekarang. Dalam menghitung NPV diperlukan data perkiraan biaya investasi, biaya operasional dan pemeliharaan serta perkiraan manfaat (*benefit*) dari proyek yang direncanakan.

2. *Benefit Cost Ratio (BCR)*

Nilai *Benefit Cost Ratio* merupakan perbandingan total pendapatan yang dihasilkan dengan total biaya yang dikeluarkan.

3. *IRR (Internal Rate of Return)*

Internal Rate of Return adalah metode dengan mencari nilai suku bunga pada saat $NPV = 0$. Suku bunga IRR kemudian dibandingkan dengan suku bunga komersial.

4. *PP (Payback Periode)*

Payback Periode merupakan jangka waktu yang diperlukan untuk mengembalikan pinjaman modal investasi.

3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis dan pembahasan kemudian diperoleh kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini. Kesimpulan tersebut diharapkan dapat memberikan informasi akurat mengenai kualitas air IPAM Ngagel II di pelanggan. Selain itu, beberapa skenario untuk meningkatkan kualitas air juga dapat diterapkan sebagai usulan bagi PDAM dan pemerintah kota setempat. Saran yang diberikan juga diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian yang akan datang.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Aspek Teknis

Aspek ini meliputi pemodelan jaringan distribusi dan simulasi model jaringan distribusi. Simulasi model terdiri dari 3 (tiga) skenario, yaitu skenario moderat, skenario pesimis, dan skenario optimis.

4.1.1 Pemodelan Jaringan distribusi dengan Sistem Dinamis

Dalam membuat struktur model dinamis jaringan distribusi PDAM diperlukan beberapa tahapan. Tahapan-tahapan tersebut meliputi perancangan model konseptual, pembuatan *stock-flow* diagram, verifikasi dan validasi model serta simulasi model. Model yang telah dibuat dapat dimodifikasi berdasarkan skenario model yang telah ditentukan.

1. Perancangan Model Konseptual

Model konseptual ini dirancang untuk memberikan gambaran umum simulasi sistem dinamis jaringan distribusi PDAM. Hal pertama yang dilakukan dalam merancang model konseptual ini adalah mengidentifikasi variabel yang terkait dan saling mempengaruhi komponen sistem untuk selanjutnya dibentuk *causal loop* diagram dari jaringan distribusi PDAM.

A. Identifikasi Variabel

Identifikasi variabel bertujuan untuk memperdalam pemahaman terhadap sistem yang akan dimodelkan. Variabel yang diidentifikasi merupakan variabel yang memiliki keterkaitan dengan jaringan distribusi PDAM. Adapun variabel yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Identifikasi Variabel Model Sistem Dinamis

No.	Variabel	Satuan
1.	Kebocoran Pipa	%
2.	Debit Air Produksi	m ³ /s
3.	Debit Air Distribusi	m ³ /s
4.	Jarak Distribusi	m
5.	Kecepatan Air	m/s
6.	<i>Headloss Mayor</i>	m
7.	Luas Penampang Pipa	m ²
8.	Diameter Pipa	m
9.	Sisa Klor	mg/liter
10.	<i>Escherichia coli</i>	MPN/100 ml

Sumber: Studi Literatur (2017)

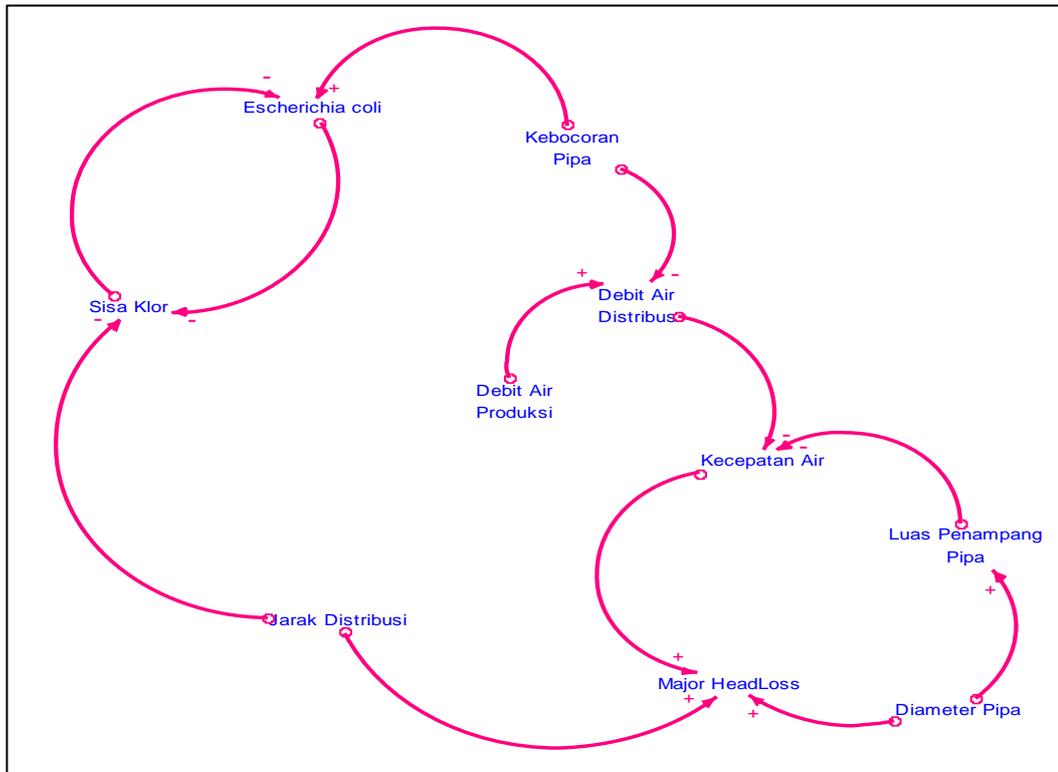
B. Causal Loop Diagram

Causal loop diagram dibuat untuk mempermudah memahami keterkaitan dan pengaruh variabel terhadap perilaku sistem sehingga diagram ini memuat semua variabel yang berpengaruh berdasarkan hasil identifikasi variabel sebelumnya.

Causal loop diagram ini menunjukkan hubungan sebab-akibat dari keterkaitan antar variabel yang nantinya dimasukkan ke dalam struktur model. Hubungan sebab-akibat pada *causal loop* ini digambarkan dengan anak panah. Hubungan antar variabel tersebut diperoleh dari studi literatur.

Pada Gambar 4.1 berikut menunjukkan bahwa *causal loop* pada penelitian ini terdiri dari *loop* positif dan *loop* negatif yang ditandai dengan tanda (+) atau (-) pada anak panah. Anak panah yang bertanda positif menunjukkan hubungan variabel yang berbanding lurus. Maksudnya, jika terjadi penambahan nilai pada variabel tersebut maka variabel yang mempengaruhinya juga mengalami penambahan nilai (Saysel and Barlas, 2001). Sebaliknya, anak panah bertanda negatif menunjukkan hubungan variabel yang berbanding terbalik. Maksudnya,

penambahan nilai terhadap variabel akan menyebabkan pengurangan nilai terhadap variabel yang mempengaruhinya (Saysel and Barlas, 2001).



Gambar 4.1 *Causal Loop* Jaringan Distribusi PDAM (Hasil Analisis, 2017)

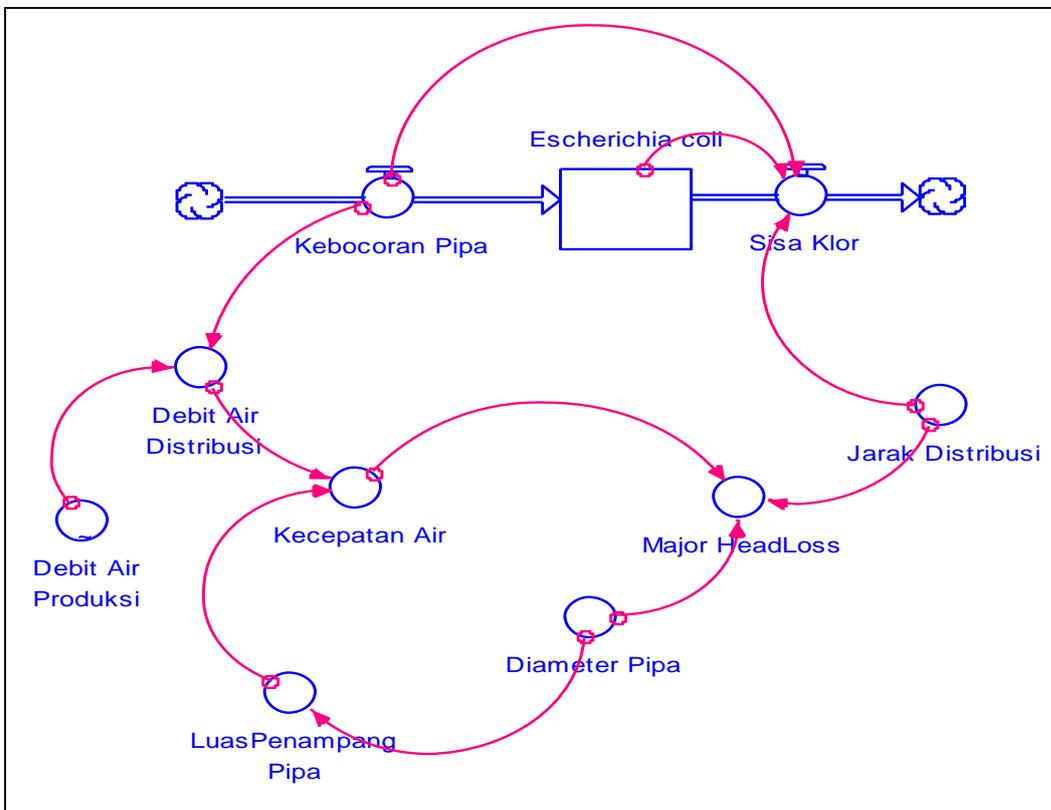
Adapun *causal loop* yang terbentuk pada model ini antara lain:

- 1) Sisa klor – *E. coli* : (-/-) *loop* negatif
- 2) Jarak Distribusi – Sisa klor : (-) *loop* negatif
- 3) Jarak Distribusi – *Headloss Mayor* : (+) *loop* positif
- 4) Debit Air Distribusi – Kecepatan Air : (-) *loop* negatif
- 5) Debit Air Produksi – Debit Air Distribusi : (+) *loop* positif
- 6) Kebocoran Pipa – Debit Air Distribusi : (-) *loop* negatif
- 7) Kebocoran Pipa - *E. coli* : (+) *loop* positif
- 8) Kecepatan Air - *Headloss Mayor* : (+) *loop* positif
- 9) Diameter Pipa - *Headloss Mayor* : (+) *loop* positif
- 10) Diameter Pipa – Luas Penampang Pipa : (+) *loop* positif
- 11) Luas Penampang Pipa – Kecepatan Air : (-) *loop* negatif

2. Stock-Flow Diagram

Stock flow diagram menggambarkan secara rinci dari sistem yang telah sebelumnya ditunjukkan dengan *causal loop* diagram. Diagram ini memperhatikan pengaruh waktu terhadap keterkaitan antar variabelnya. Variabel akan menunjukkan laju aktivitas sistem tiap periode waktu. Pada jaringan distribusi PDAM hanya menggunakan *converter* sebagai tempat menyimpan konstanta yang diketahui dan sebagai *input* dalam *formulations* yang digunakan.

Adapun *stock-flow* diagram pada model dinamis jaringan distribusi PDAM seperti pada Gambar 4.2 yang dibangun berdasarkan *causal loop*.



Gambar 4.2 Model Dinamis Jaringan Distribusi PDAM (Hasil Analisis, 2017)

Gambar 4.2 tersebut menunjukkan model dinamis jaringan distribusi PDAM dimana setiap variabelnya saling mempengaruhi.

Adapun formulasi model yang diinput ke tiap variabel dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Formulasi Model

No	Variabel	Model Buildings	Formulations
1.	Kebocoran Pipa	<i>Flow</i>	Kebocoran_Pipa = 0.15
2.	Debit Air Produksi	<i>Converter</i>	Debit_Air_Produksi = <i>Graph Of Time</i>
3.	Debit Air Distribusi	<i>Converter</i>	Debit_Air_Distribusi = (Debit_Air_Produksi) - (Kebocoran_Pipa * Debit_Air_Produksi)
4.	Diameter Pipa	<i>Converter</i>	Diameter_Pipa = 0.6
5.	Luas Penampang Pipa	<i>Converter</i>	Luas_Penampang_Pipa = $3.14 * (1/4 * \text{Diameter_Pipa}^2)$
6.	Kecepatan Air	<i>Converter</i>	Kecepatan_Air = Debit_Air_Distribusi / Luas_Penampang_Pipa
7.	Jarak Distribusi	<i>Converter</i>	Jarak_Distribusi = <i>Graph Of Time</i>
8.	<i>Headloss Mayor</i>	<i>Converter</i>	Headloss_Mayor = $(100 * (\text{Kecepatan_Air}^2) * (\text{Jarak_Distribusi}) / (2 * 0.98 * \text{Diameter_Pipa}))$
9.	Sisa Klor	<i>Flow</i>	Sisa_Klor = $0,362 - (0,000039 * \text{Jarak} + 0,00023 * \text{E.Coli} + 0,092 * \text{Kebocoran Pipa})$
10.	<i>Escherichia coli</i>	<i>Stock</i>	<i>Escherichia_coli</i> = <i>Graph Of Time</i>

Sumber: Studi Literatur (2017)

A. **Input Data Pada Formulations dengan Data Sekunder dan Persamaan Matematis**

Input data dengan menggunakan data sekunder dan rumus matematis ini dilakukan jika variabel memiliki data sekunder yang diperoleh dari PDAM sedangkan rumus matematis digunakan jika nilai salah satu variabel dapat diketahui dengan menggunakan rumus matematis yang telah ada.

1) Kebocoran Pipa

Pada *converter* kebocoran pipa data yang diinput, yaitu:

- Pada model untuk simulasi skenario moderat (kondisi eksisting) digunakan nilai 0,25 atau 25% yang merupakan hasil *trial and error* pada model untuk mendapatkan model yang sesuai dengan kondisi riil pada sistem jaringan distribusi.
- Pada model untuk simulasi skenario pesimis (kondisi ekstrim) digunakan nilai 0,50 atau 50% yang merupakan data tingkat kebocoran air tertinggi untuk rata-rata PDAM di Indonesia.
- Pada model untuk simulasi skenario optimis (kondisi optimum) digunakan nilai 0,20 atau 20% yang merupakan standar nasional untuk indeks kebocoran pipa yang dikeluarkan oleh Dinas Pekerjaan Umum melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (KSNP-SPAM).

2) Debit Air Produksi

Input data pada *converter* debit air produksi IPAM Ngagel II Surabaya menggunakan data sekunder yang diperoleh dari PDAM yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 *Graph Of Time Input* Debit Air Produksi IPAM Ngagel II

Hari ke-	Debit Air Produksi (liter/detik)	Debit Air Produksi (m ³ /detik)
1.	860	0,86
2.	860	0,86
3.	869	0,87
4.	986	0,99
5.	890	0,89
6.	950	0,95

(Lanjutan) Tabel 4.3 *Graph Of Time Input* Debit Air Produksi IPAM Ngagel II

Hari ke-	Debit Air Produksi (liter/detik)	Debit Air Produksi (m ³ /detik)
7.	987	0,99
8.	987	0,99
9.	987	0,99

Sumber: PDAM (2017)

3) Debit Air Distribusi

Formulasi yang dimasukkan pada *converter* untuk mendapatkan nilai debit air distribusi berdasarkan persamaan berikut:

$$Q = (Qp) - (y \times Qp) \quad (4.1)$$

dengan:

Q = Debit Air Distribusi (m³/s)

Qp = Debit Air Produksi (m³/s)

y = Kebocoran Pipa

4) Diameter Pipa

Pipa yang digunakan pada model ini merupakan pipa primer dengan diameter 600 mm atau 0,6 m (PDAM, 2017).

5) Luas Penampang Pipa

Untuk mendapatkan luas penampang pipa maka pada *converter* Luas_Penampang_Pipa digunakan formulasi berdasarkan persamaan berikut:

$$A = 3.14 \times \left(\frac{1}{4} \times d^2\right) \quad (4.2)$$

dengan:

A = Luas Penampang Pipa (m²)

d = Diameter Pipa (m)

6) Kecepatan Air

Formulasi yang digunakan pada *converter* Kecepatan_Air diperoleh dari persamaan berikut:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4.3)$$

dengan:

V = Kecepatan Air (m/s)

Q = Debit Air Distribusi (m³/s)

A = Luas Penampang Pipa (m²)

7) Jarak Distribusi

Jarak distribusi yang digunakan adalah 5000 m, 7000 m, dan 10000 m yang dianggap dapat mewakili wilayah pelayanan IPAM Ngagel II Surabaya.

8) *Headloss Mayor*

Formulasi yang digunakan pada *converter* Headloss_Mayor diperoleh dari persamaan *Darcy-Weisbach* (4.4) dengan asumsi bahwa tidak ada perubahan luas penampang di dalam pipa.

$$hf = f \frac{(V^2 \times L)}{(2 \times d \times 0,98)} \quad (4.4)$$

dengan:

hf = *Headloss Mayor* (m)

f = Koefisien Gesekan Pipa
(Pada model ini digunakan nilai 100)

V = Kecepatan Air (m/s)

L = Panjang Pipa (m)
(Pada model ini digunakan jarak distribusi sebagai panjang pipa)

d = Diameter Pipa (m)

9) *Escherichia coli*

Pada *stock Escherichia coli* nilai yang dimasukkan disesuaikan dengan data primer yang merupakan hasil pengukuran di lapangan berdasarkan jarak distribusi. Berikut Tabel 4.4 yang merupakan data primer pengukuran *Escherichia coli*.

Tabel 4.4 Data Jumlah *Escherichia coli*

No.	Jarak Distribusi (m)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)
1.	5000	0
2.	5000	0
3.	5000	1
4.	5000	0
5.	5000	0
6.	7000	1
7.	7000	5
8.	7000	3
9.	7000	2
10.	7000	1
11.	10000	25
12.	10000	25
13.	10000	21

Sumber: Data Primer (2017)

B. Input Data Menggunakan Persamaan Regresi

Pada *Flow* variabel sisa klor digunakan persamaan hasil analisa regresi sisa klor terhadap *Escherichia coli*, jarak distribusi, dan kebocoran pipa yang diperoleh dari data primer dan data sekunder untuk mendapatkan besarnya pengaruh antar variabel tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Afriani *et al* (2016) menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang kuat antara sisa klor dengan jarak distribusi di jaringan distribusi sedangkan kondisi pipa yang rusak atau bocor merupakan faktor lain yang dapat mempengaruhi keberadaan sisa klor. Penelitian yang dilakukan oleh Anggraini *et al* (2017) menunjukkan nilai korelasi yang rendah antara jarak dari reservoir terhadap konsentrasi sisa klor. Hal tersebut dikarenakan adanya faktor kebocoran pipa yang menyebabkan peningkatan jumlah mikroorganisme di dalam jaringan distribusi.

Oleh karena itu, perlu ditentukan persamaan regresi yang menunjukkan hubungan pengaruh antara keempat variabel tersebut. Berikut Tabel 4.5 yang merupakan data jarak distribusi, sisa klor, *Escherichia coli*, dan nilai kebocoran pipa yang diperoleh dari data sekunder.

Tabel 4.5 Data Jarak Distribusi, Sisa Klor, *Escherichia coli*, dan Kebocoran Pipa

No.	Jarak Distribusi (m)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Kebocoran Pipa*
1.	5000	0,22	0	0,1
2.	5000	0,11	0	0,1
3.	5000	0,11	1	0,1
4.	5000	0,22	0	0,1
5.	5000	0,22	0	0,1
6.	7000	0,11	1	0,1
7.	7000	0,08	5	0,1
8.	7000	0,08	3	0,1
9.	7000	0,11	2	0,1
10.	7000	0,11	1	0,1
11.	10000	0	25	0,25
12.	10000	0	25	0,25
13.	10000	0	21	0,25

(Lanjutan) Tabel 4.5 Data Jarak Distribusi, Sisa Klor, *Escherichia coli*, dan Kebocoran Pipa

No.	Jarak Distribusi (m)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Kebocoran Pipa*
14.	10000	0	18	0,25
15.	10000	0	27	0,25

Sumber: Data Primer (2017)

*Data Sekunder PDAM (2017)

Berdasarkan data jarak distribusi, sisa klor, nilai kebocoran pipa, dan *Escherichia coli* diatas maka dapat diketahui persamaan regresinya untuk kemudian menjadi *input* pada *formulations* di model dinamis yang telah dibangun.

Adapun hasil analisis regresinya ditunjukkan pada Lampiran 3 dimana nilai uji F pada analisis varian (Anova) dan uji T parsial memiliki *P-value* 0,000 dimana nilai tersebut < 0,05 sehingga variabel jarak distribusi, *Escherichia coli*, dan kebocoran pipa secara individu ataupun parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel sisa klor. Berdasarkan Lampiran 3 persamaan regresi yang terbentuk adalah Sisa Klor = 0,362 – (0,000039 Jarak Distribusi + 0,00023 E.Coli + 0,092 Kebocoran Pipa).

Pada persamaan regresi tersebut nilai intersep yang diperoleh adalah 0,362, maksudnya apabila variabel-variabel perubahan, yaitu jarak distribusi, kebocoran pipa, dan *Escherichia coli* sama dengan nol maka sisa klor memiliki nilai awal sebesar 0,362.

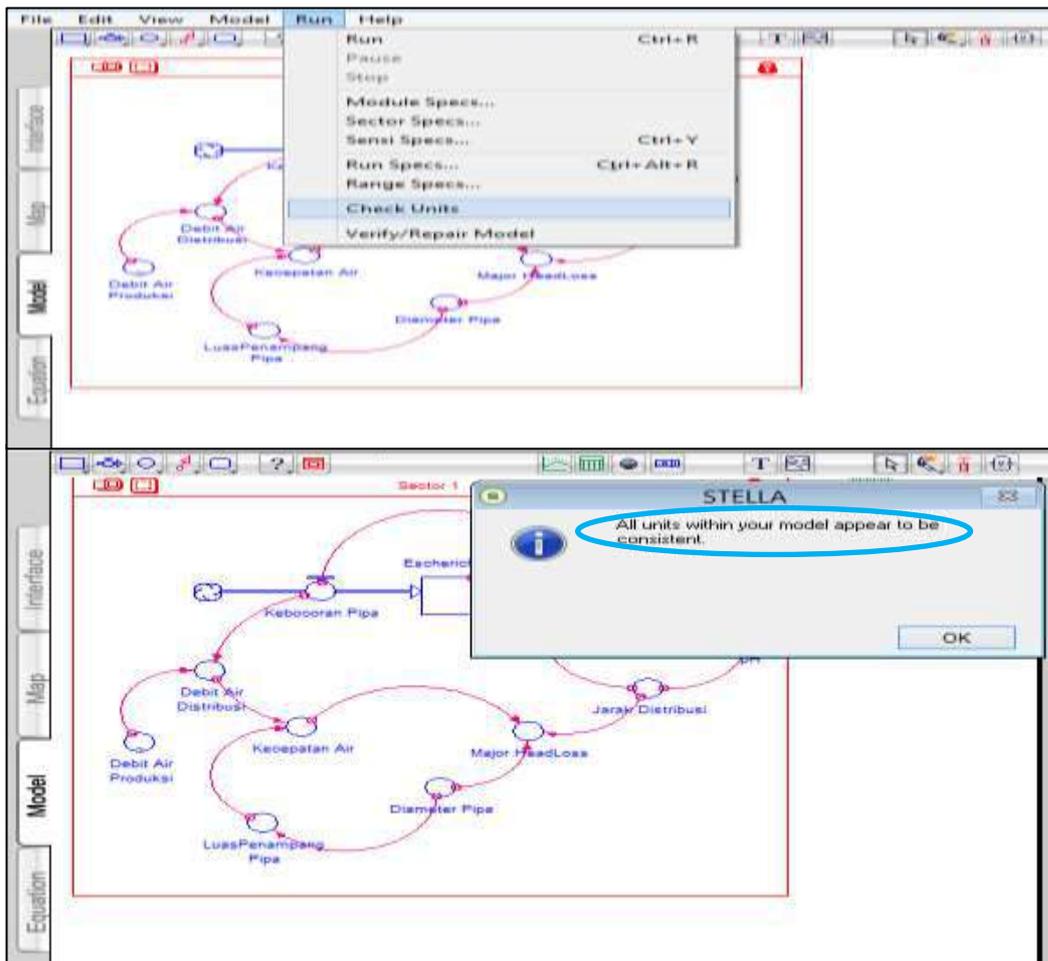
Nilai koefisien determinasi (*R square*) diperoleh sebesar 78,7%, artinya sebanyak 78,7% dari seluruh variasi sisa klor dapat dijelaskan oleh *Escherichia coli*, kebocoran pipa, dan jarak distribusi sedangkan 21,3% merupakan faktor lain yang tidak diperhitungkan di dalam model atau faktor yang tidak dijadikan variabel independen dalam penelitian ini. Hasil *R square* yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa model yang terbentuk telah cukup menggambarkan hubungan antar keempat variabel.

3. Verifikasi dan Validasi Model

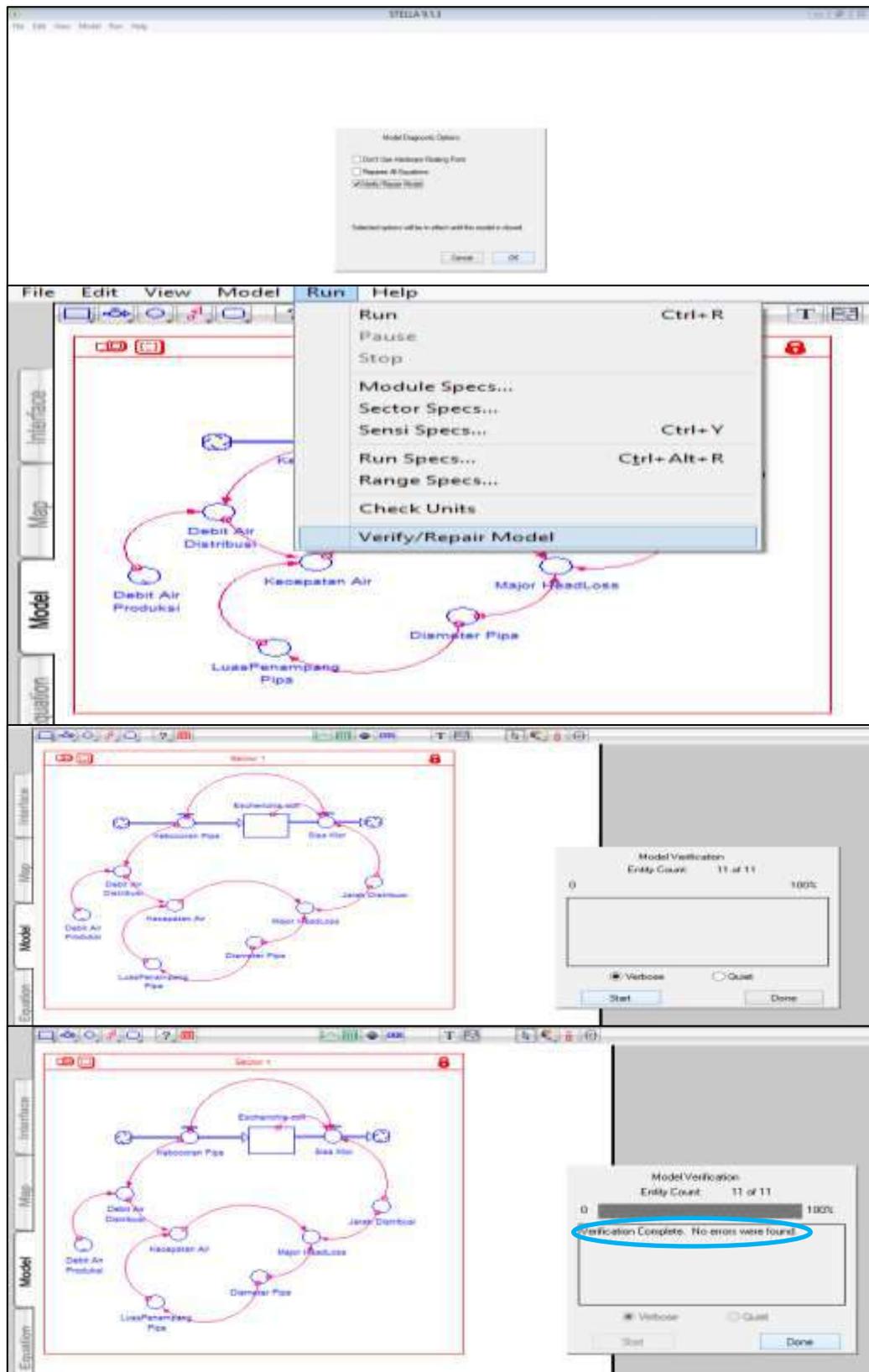
Verifikasi dan validasi ini dilakukan untuk membandingkan perilaku sistem dengan keadaan yang sebenarnya sehingga nantinya model yang telah terverifikasi dan tervalidasi ini mampu mewakili keadaan riil sistem dalam hal ini jaringan distribusi IPAM Ngagel II.

A. Verifikasi Model

Berdasarkan hasil verifikasi model, model jaringan distribusi PDAM ini telah berjalan dengan baik tanpa ada *error* baik pada formulasi maupun pada satuan. Proses verifikasi model dinamis jaringan distribusi PDAM dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.6 Verifikasi Unit Model (Hasil Analisa, 2017)



Gambar 4.7 Verifikasi Struktur Model (Hasil Analisa, 2017)

B. Validasi Model

Validasi dilakukan untuk meyakinkan bahwa model telah memenuhi tujuan pembuatan model secara menyeluruh dan dapat mempresentasikan sistem nyata.

1) Uji Struktur Model (*Model Structure Test*)

Tujuan dari uji ini adalah untuk melihat apakah struktur model sesuai dengan sistem nyata. Pengujian struktur model pada penelitian ini dilakukan dengan studi literatur untuk memahami konsep maupun kondisi aktual dari jaringan distribusi PDAM berdasarkan variabel-variabel penelitian.

Berikut Tabel 4.6 yang menunjukkan hubungan antar variabel yang digunakan pada penelitian ini dan hasil studi literatur yang membentuk *causal loop* berdasarkan konsep yang ada sehingga struktur model dapat dikatakan **valid**.

Tabel 4.6 Hubungan Antar Variabel Model

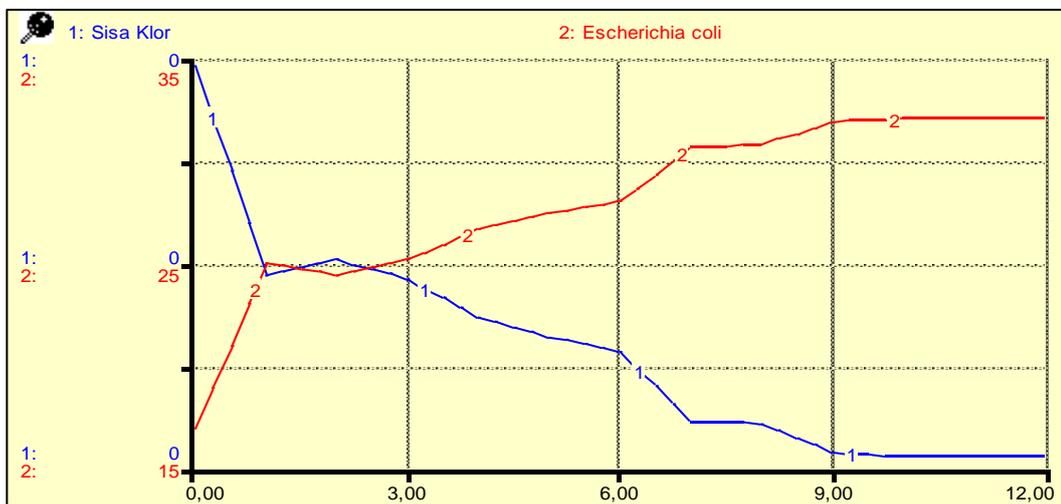
No.	Variabel <i>Causal</i>	Variabel <i>Impact</i>	<i>Causal</i>	<i>Impact</i>	Literatur
1.	Sisa klor	<i>E. coli</i>	↑	↓	Andhika <i>et al.</i> (2013)
2.	<i>E. coli</i>	Sisa klor	↑	↓	Retnowati (2015)
3.	Jarak Distribusi	Sisa Klor	↑	↓	Syahputra (2012), Anggraini <i>et al</i> (2017)
4.	Jarak Distribusi	<i>Headloss Mayor</i>	↑	↑	Pada Persamaan 2.4
5.	Debit Air Distribusi	Kecepatan Air	↑	↓	Pada Persamaan 2.2
6.	Debit Air Produksi	Debit Air Distribusi	↑	↑	Pada Persamaan 2.1
7.	Kebocoran Pipa	Debit Air Distribusi	↑	↓	Pal <i>et al.</i> , 2010
8.	Kebocoran Pipa	<i>E. coli</i>	↑	↑	Afrianita <i>et al.</i> (2016)
9.	Kecepatan Air	<i>Headloss Mayor</i>	↑	↑	Pada Persamaan 2.4
10.	Diameter Pipa	<i>Headloss Mayor</i>	↑	↑	Pada Persamaan 2.4
11.	Diameter Pipa	Luas Penampang Pipa	↑	↑	Pada Persamaan 2.3
12.	Luas Penampang Pipa	Kecepatan Air	↑	↓	Pada Persamaan 2.2

Sumber: Studi Literatur (2017)

2) Uji Parameter Model (*Model Parameter Test*)

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. Logika ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi yang dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Uji Parameter Model (*Model Parameter Test*) (Hasil Analisis, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Berdasarkan Gambar 4.8 diatas yang merupakan hasil simulasi untuk uji parameter model, pola grafik menunjukkan bahwa sisa klor yang ditandai oleh garis biru semakin menurun seiring dengan semakin meningkatnya jumlah *Escherichia coli* yang ditandai oleh garis merah. Sehingga berdasarkan hasil uji parameter model tersebut maka dapat diketahui bahwa semakin sedikit konsentrasi sisa klor maka semakin meningkat pertumbuhan 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 dimana jumlah *Escherichia coli* sebelum diinjeksi klor mencapai 923 MPN/100 ml sampel sedangkan ketika klor diinjeksikan, jumlah *Escherichia coli* berkurang signifikan hingga mencapai 7 MPN/100 ml sampel. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Retnowati (2015) yang menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara konsentrasi klor dengan jumlah bakteri *Escherichia coli*.

Sehingga berdasarkan hasil uji parameter model (*Model Parameter Test*) tersebut, parameter simulasi model sudah berjalan sesuai dengan logika aktual sehingga model dapat dikatakan **valid**.

3) Uji Perilaku Model/Replikasi

Secara kuantitatif validasi model dilakukan dengan metode *black box*. Metode ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai hasil simulasi dengan nilai aktual di lapangan untuk menemukan nilai *error* dari model yang telah dibangun. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$E = |(S - A) / A| \quad (4.5)$$

dengan,

E = Variansi *error* antara data aktual dengan data hasil simulasi

S = Data hasil simulasi

A = Data aktual

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

Model jaringan distribusi PDAM ini disimulasikan selama 9 hari dengan data aktual lapangan yang diperoleh dengan cara *sampling* untuk parameter sisa klor dan *Escherichia coli* dengan 3 (tiga) titik *sampling*. Titik *sampling* berada pada zona terdekat dengan layanan IPAM, zona yang berada di pertengahan

wilayah pelayanan, dan zona terjauh dari IPAM. Berikut tabel perhitungan *error* pada pemodelan ini.

Tabel 4.7 Perhitungan *Error* Model Jaringan Distribusi PDAM

Jarak (m)	Sisa Klor (mg/l)		<i>Error</i>
	Simulasi (S)	Aktual (A)	
5000	0,15	0,16	0,03
7000	0,11	0,10	0,08
10000	0	0	0
Rata-Rata	0,087	0,087	0

Sumber: Hasil Analisa (2017)

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

4.1.2 Simulasi Model Jaringan Distribusi

Simulasi model jaringan 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 jaringan distribusi ini adalah skenario 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.

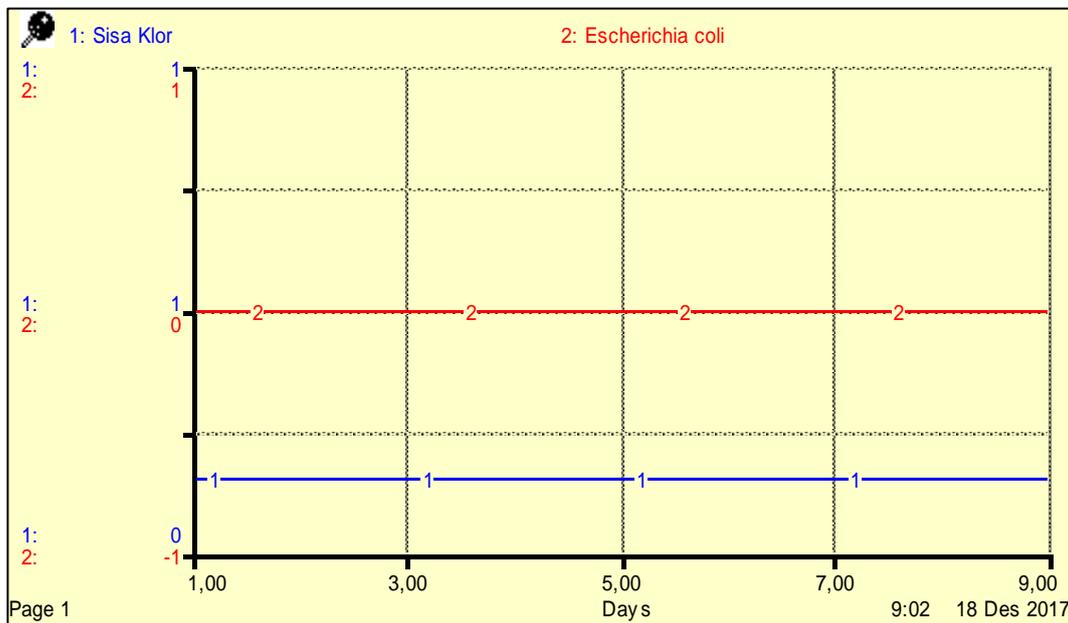
Selain itu, setiap skenario terdapat 3 (tiga) model yang merupakan 3 (tiga) titik sampel dari wilayah pelayanan IPAM Ngagel II dengan hasil simulasi masing-masing berupa prediksi kualitas air berdasarkan parameter sisa klor dan *Escherichia coli* serta prediksi kuantitas air berdasarkan debit air pada jaringan distribusi hingga hari ke-9.

1. Skenario Moderat (Kondisi Eksisting)

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

A. Kualitas Air (Parameter Sisa Klor dan *Escherichia coli*)

Hasil simulasi yang ditunjukkan Gambar 4.9 dan Tabel 4.8 berikut merupakan model untuk jarak distribusi 5 km dari reservoir.



Gambar 4.9 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (5 km)

(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.8 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (5 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	5.000	0,15	0
2	5.000	0,15	0
3	5.000	0,15	0
4	5.000	0,15	0
5	5.000	0,15	0
6	5.000	0,15	0
7	5.000	0,15	0
8	5.000	0,15	0
Final	5.000		0

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter

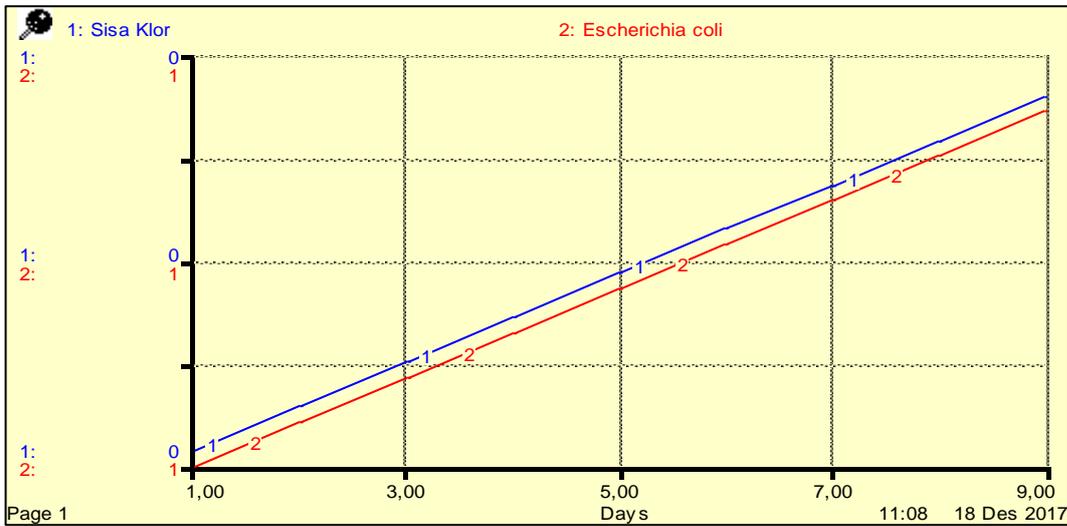
- Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi dengan 25% kebocoran pipa, pada jarak 5 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 5 km tidak terlalu berpengaruh terhadap penurunan sisa klor. Hal ini dibuktikan dengan konsentrasi sisa klor pada jarak tersebut hingga hari ke-9 masih mencapai 0,15 mg/l. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sugiarti *et al* (2014) dimana pengaruh jarak pengaliran air terhadap sisa klor cenderung rendah dengan nilai koefisien korelasi 0,272 ketika jarak 0 – 6 km.

Gambar 4.10 dan Tabel 4.9 berikut merupakan hasil simulasi model dengan jarak 7 km dari reservoir.



Gambar 4.10 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (7 km)

(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.9 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (7 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	<i>Escherichia coli</i>
1	7.000	0,11	1
2	7.000	0,11	1
3	7.000	0,11	1
4	7.000	0,11	1
5	7.000	0,11	1
6	7.000	0,11	1
7	7.000	0,11	1
8	7.000	0,11	1
Final	7.000		1

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter

- Sisa klor dalam satuan mg/l

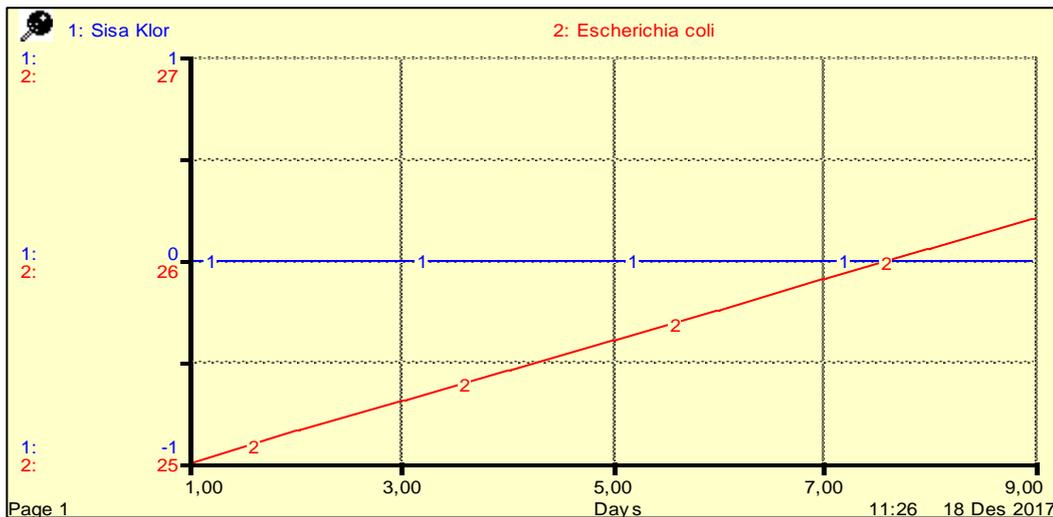
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi pada jarak 7 km dari reservoir dengan 25% kebocoran pipa, terjadi penurunan konsentrasi sisa klor menjadi 0,11 mg/l dari 0,15 mg/l pada jarak 5 km.

Pada Gambar 4.10 dan Tabel 4.9 juga menunjukkan adanya *Escherichia coli* sebesar 1 MPN/100 ml sampel pada jaringan distribusi meskipun konsentrasi sisa klor sebesar 0,11 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.

Penelitian yang dilakukan oleh Lehtola *et al* (2004) menunjukkan bahwa terdapat perbedaan konsentrasi sisa klor pada pipa PVC dan pipa tembaga dimana pada pipa tembaga penurunan klor lebih cepat dibanding pipa PVC sehingga pipa tembaga memerlukan dosis klor yang lebih tinggi dari pipa PVC untuk keefektifan proses desinfeksi. Penelitian Heim dan Dietrich (2006) juga menyimpulkan bahwa jenis pipa dapat mempengaruhi konsentrasi sisa klor di jaringan distribusi dimana pipa HDPE membutuhkan klor yang lebih banyak 0,1-0,9 mg/cm² daripada pipa PVC.

Gambar 4.11 dan Tabel 4.10 berikut merupakan model untuk jarak 10 km dari reservoir.



Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (10 km) (Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.10 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Moderat (10 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	10.000	0,00	25
2	10.000	0,00	25
3	10.000	0,00	25
4	10.000	0,00	25
5	10.000	0,00	26
6	10.000	0,00	26
7	10.000	0,00	26
8	10.000	0,00	26
Final	10.000		26

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter

- Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Berdasarkan kondisi riil sistem jaringan distribusi dengan 25% kebocoran pipa pada jarak 10 km dari reservoir, sisa klor telah habis sedangkan jumlah *Escherichia coli* mengalami peningkatan yang signifikan hingga mencapai 25 MPN/100 ml sampel dan pada hari ke-5 mencapai jumlah 26 MPN/100 ml sampel. Hal ini dikarenakan sepanjang 10 km jarak distribusi, sisa klor mengalami kontak dengan mikroorganisme penyebab kontaminasi air akibat dari jaringan distribusi yang mengalami kebocoran sehingga konsentrasi sisa klor mengalami penurunan hingga habis pada jarak 10 km. Oleh karena sisa klor telah habis maka jumlah *Escherichia coli* mengalami peningkatan akibat jaringan distribusi yang mengalami kebocoran.

Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012) dimana jumlah *Escherichia coli* lebih dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor. *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar 0,85 (kuat) terhadap kekeruhan yang diakibatkan oleh kebocoran pipa sedangkan antara sisa klor dengan *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar -0,36 (lemah).

B. Kuantitas Air (Debit Air Distribusi)

Hasil simulasi untuk prediksi debit air hingga hari ke-9 ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Moderat

Days	Debit Air Produksi	Debit Air Distribusi
1	0,86	0,65
2	0,86	0,65
3	0,87	0,65
4	0,99	0,74
5	0,89	0,67
6	0,95	0,71
7	0,99	0,74
8	0,99	0,74
Final	0,99	0,74

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan : - Debit air produksi dalam satuan m³/detik
- Debit air distribusi dalam satuan m³/detik

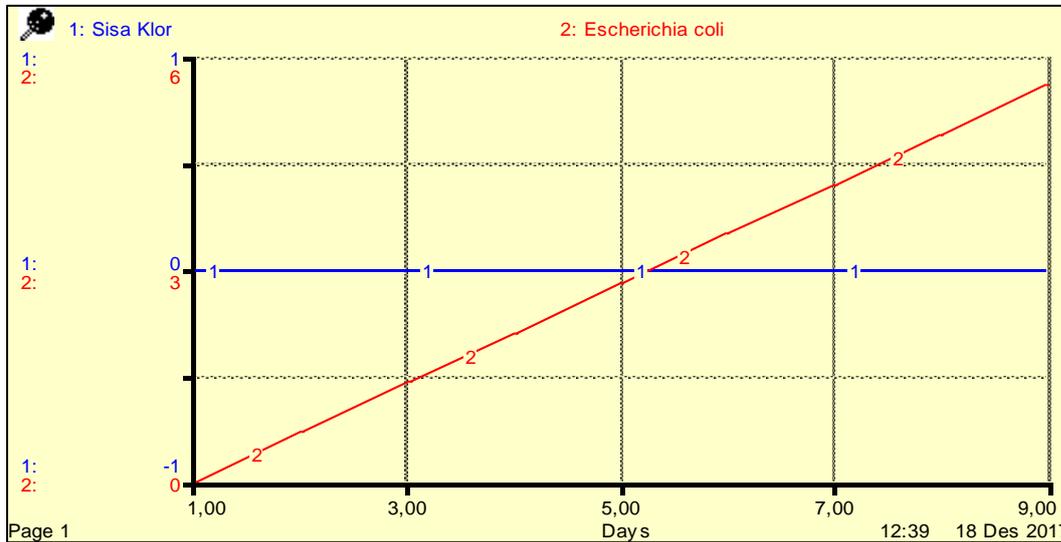
Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.11, debit air mengalami penurunan yang disebabkan adanya asumsi kebocoran pipa sebesar 25% pada jaringan distribusi. Debit air mengalami penurunan sekitar 24,4% - 25,2% dari debit air produksi. Pada simulasi skenario moderat ini tidak ada perbedaan debit air distribusi pada jarak 5 km, 7 km, dan 10 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.

2. Skenario Pesimis (Kondisi Ekstrim)

Skenario ini diterapkan dengan asumsi kebocoran pipa sebesar 50% yang merupakan hasil studi literatur dimana rata-rata tingkat kebocoran pipa PDAM di Indonesia adalah 50%.

A. Kualitas Air (Parameter Sisa Klor dan *Escherichia coli*)

Hasil simulasi skenario pesimis ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan Tabel 4.12 untuk model dengan jarak 5 km dari reservoir.



Gambar 4.12 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (5 km)

(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.12 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (5 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	5.000	0,00	0
2	5.000	0,00	1
3	5.000	0,00	1
4	5.000	0,00	2
5	5.000	0,00	3
6	5.000	0,00	4
7	5.000	0,00	4
8	5.000	0,00	5
Final	5.000		6

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter

- Sisa klor dalam satuan mg/l

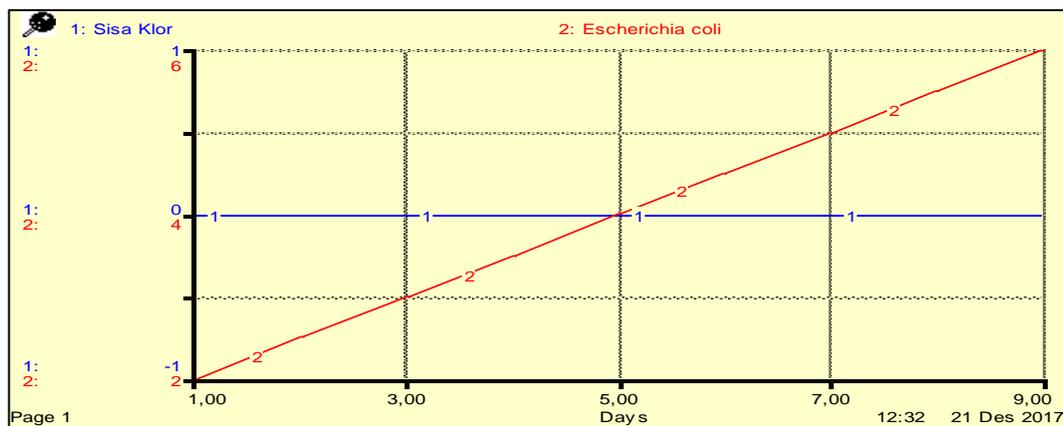
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Dengan tingkat kebocoran pipa mencapai 50% pada jarak 5 km, sisa klor telah habis yang menyebabkan munculnya *Escherichia coli* dan terus meningkat rata – rata 1 MPN/100 ml sampel per hari. Hal ini kemungkinan karena kebocoran pipa yang mencapai 50% sehingga senyawa – senyawa organik yang berada di luar jaringan distribusi masuk ke dalam jaringan. Senyawa-senyawa organik tersebut dapat menyebabkan munculnya *biofilm* di dinding pipa yang merupakan substrat untuk pertumbuhan mikroorganismenya.

Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012) dimana jumlah *Escherichia coli* lebih banyak dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor. *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar 0,85 (kuat) terhadap kekeruhan yang diakibatkan oleh kebocoran pipa sedangkan antara sisa klor dengan *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar -0,36 (lemah).

Selain senyawa – senyawa organik, kemungkinan akan masuknya *Escherichia coli* langsung juga dapat terjadi. Hal ini dapat disebabkan karena lokasi penelitian merupakan lokasi dengan kepadatan penduduk yang tinggi di Surabaya sehingga ketika terjadi kebocoran pipa peluang untuk masuknya *Escherichia coli* semakin besar akibat pencemaran tanah atau air tanah dari limbah domestik.

Gambar 4.13 dan Tabel 4.13 berikut untuk model dengan jarak 7 km dari reservoir.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (7 km) (Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l
 - *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.13 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (7 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	<i>Escherichia coli</i>
1	7.000	0,00	2
2	7.000	0,00	3
3	7.000	0,00	3
4	7.000	0,00	4
5	7.000	0,00	4
6	7.000	0,00	5
7	7.000	0,00	5
8	7.000	0,00	6
Final	7.000		6

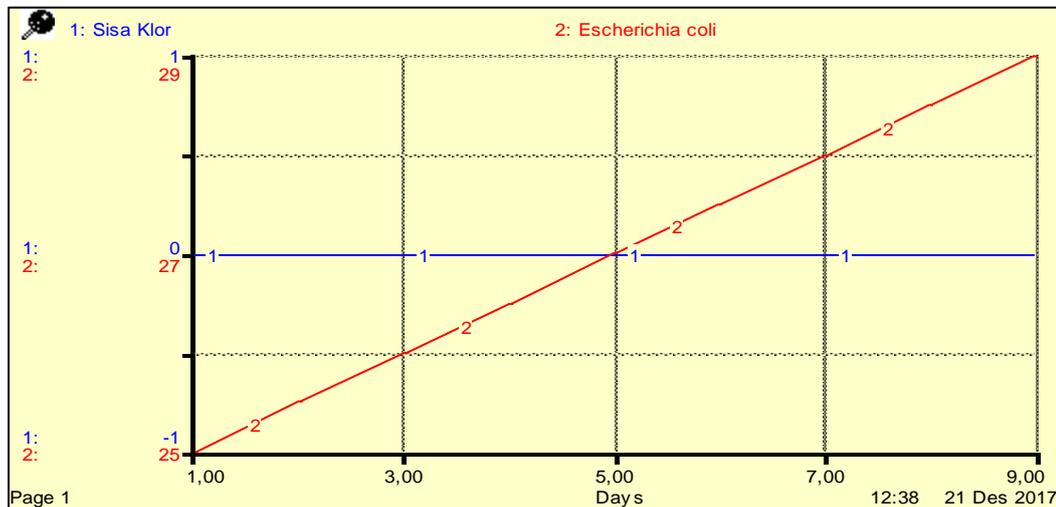
Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter
 - Sisa klor dalam satuan mg/l
 - *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Ketika tingkat kebocoran pipa mencapai 50% pada jarak yang lebih jauh, yaitu 7 km sisa klor yang telah habis menyebabkan peningkatan *Escherichia coli* pada hari ke-1 telah mencapai 2 MPN/100 ml sampel hingga hari ke-9 diprediksi jumlah *Escherichia coli* mencapai 6 MPN/100 ml sampel. Hal ini juga dikarenakan kebocoran pipa menyebabkan senyawa – senyawa organik yang berada di luar jaringan masuk ke dalam jaringan distribusi. Senyawa-senyawa organik tersebut dapat menyebabkan munculnya *biofilm* di dinding pipa yang merupakan substrat untuk pertumbuhan mikroorganisme sehingga ketika sisa klor yang merupakan desinfektan telah habis, *Escherichia coli* dapat tumbuh di jaringan distribusi.

Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012) dimana jumlah *Escherichia coli* lebih banyak dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor. *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar 0,85 (kuat) terhadap kekeruhan yang diakibatkan oleh kebocoran pipa sedangkan antara sisa klor dengan *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar -0,36 (lemah).

Gambar 4.14 dan Tabel 4.14 berikut merupakan model untuk jarak 10 km dari reservoir.



Gambar 4.14 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (10 km)
(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.14 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Pesimis (10 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	10.000	0,00	25
2	10.000	0,00	26
3	10.000	0,00	26
4	10.000	0,00	27
5	10.000	0,00	27
6	10.000	0,00	28
7	10.000	0,00	28
8	10.000	0,00	29
Final	10.000		29

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter
- Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tingkat kebocoran pipa 50% pada jarak 10 km menunjukkan sisa klor habis yang menyebabkan munculnya *Escherichia coli* dan terus hingga hari ke-9 bahkan telah mencapai 29 MPN/100 ml sampel. Hal ini kemungkinan karena kebocoran pipa yang mencapai 50% sehingga senyawa – senyawa organik yang berada di luar jaringan distribusi masuk ke dalam jaringan. Senyawa-senyawa organik tersebut dapat menyebabkan munculnya *biofilm* di dinding pipa yang merupakan substrat untuk pertumbuhan mikroorganismenya sehingga akan bereaksi dengan sisa klor sebagai desinfeksi.

Selain senyawa – senyawa organik, kemungkinan akan masuknya *Escherichia coli* langsung juga dapat terjadi. Hal ini dapat disebabkan karena lokasi penelitian merupakan lokasi dengan kepadatan penduduk yang tinggi di Surabaya sehingga ketika terjadi kebocoran pipa peluang untuk masuknya *Escherichia coli* semakin besar akibat pencemaran tanah atau air tanah dari limbah domestik.

Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012) dimana jumlah *Escherichia coli* lebih banyak dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor. *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar 0,85 (kuat) terhadap kekeruhan yang diakibatkan oleh kebocoran pipa sedangkan antara sisa klor dengan *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar -0,36 (lemah).

B. Kuantitas Air (Debit Air Distribusi)

Hasil simulasi untuk prediksi debit air hingga hari ke-9 ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.15, debit air mengalami penurunan yang disebabkan adanya asumsi kebocoran pipa sebesar 50% pada jaringan distribusi. Debit air mengalami penurunan sekitar 49,5% - 50% dari debit air produksi. Pada simulasi skenario ini tidak terdapat perbedaan debit air distribusi pada jarak 5 km, 7 km, dan 10 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 4.15 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Pesimis

Days	Debit Air Produksi	Debit Air Distribusi
1	0,86	0,43
2	0,86	0,43
3	0,87	0,44
4	0,99	0,50
5	0,89	0,45
6	0,95	0,47
7	0,99	0,50
8	0,99	0,50
Final	0,99	0,50

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan : - Debit air produksi dalam satuan m³/detik
 - Debit air distribusi dalam satuan m³/detik

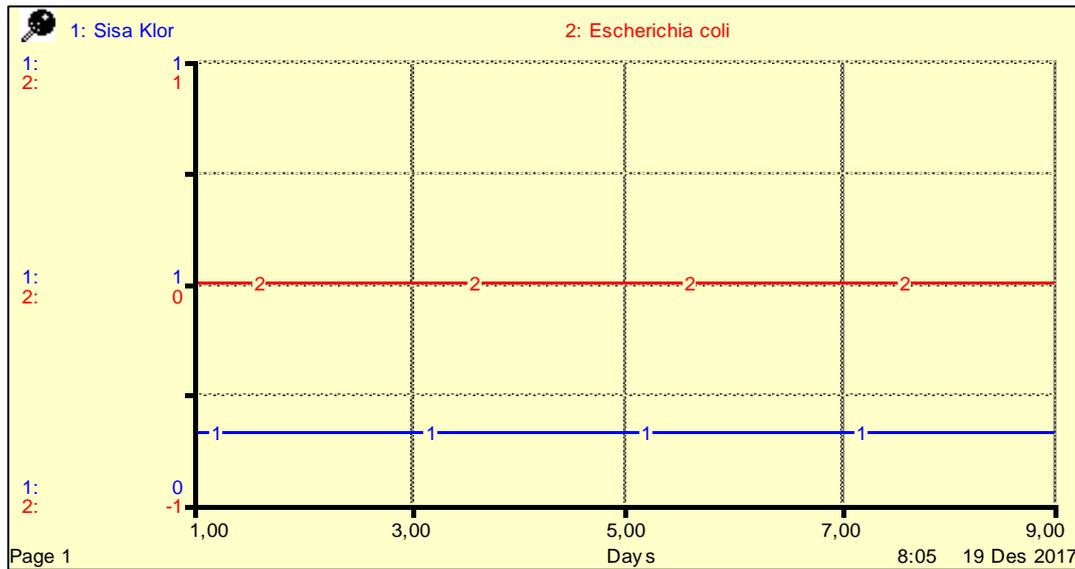
3. Skenario Optimis (Kondisi Optimum)

Skenario ini diterapkan dengan asumsi kebocoran pipa sebesar 20% yang merupakan standar nasional persentase maksimal kebocoran pipa PDAM di Indonesia yang dikeluarkan oleh Dinas Pekerjaan Umum.

A. Kualitas Air (Parameter Sisa Klor dan *Escherichia coli*)

Hasil simulasi skenario optimis ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Tabel 4.16 untuk model dengan jarak 5 km dari reservoir.

Hasil simulasi dengan 20% kebocoran pipa konsentrasi sisa klor di jarak 5 km sebesar 0,16 mg/l dengan *Escherichia coli* 0 MPN/100 ml sampel. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kebocoran pipa mencapai 20% namun, klor masih dapat mendesinfeksi senyawa-senyawa organik dan mikroorganisme yang masuk ke dalam jaringan distribusi.



Gambar 4.15 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (5 km)
(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

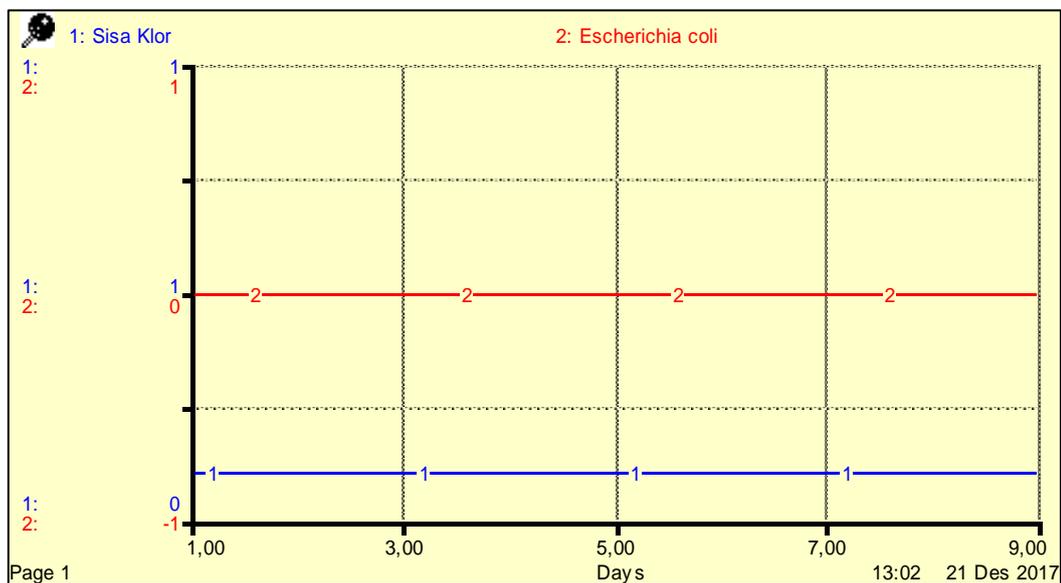
Tabel 4.16 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (5 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	5.000	0,16	0
2	5.000	0,16	0
3	5.000	0,16	0
4	5.000	0,16	0
5	5.000	0,16	0
6	5.000	0,16	0
7	5.000	0,16	0
8	5.000	0,16	0
Final	5.000		0

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter
- Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Berikut Gambar 4.16 dan Tabel 4.17 untuk model kualitas air dengan jarak 7 km dari reservoir.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (7 km)
(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.17 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (7 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	7.000	0,10	0
2	7.000	0,10	0
3	7.000	0,10	0
4	7.000	0,10	0
5	7.000	0,10	0
6	7.000	0,10	0
7	7.000	0,10	0
8	7.000	0,10	0
Final	7.000		0

Sumber: Hasil Analisa (2017)

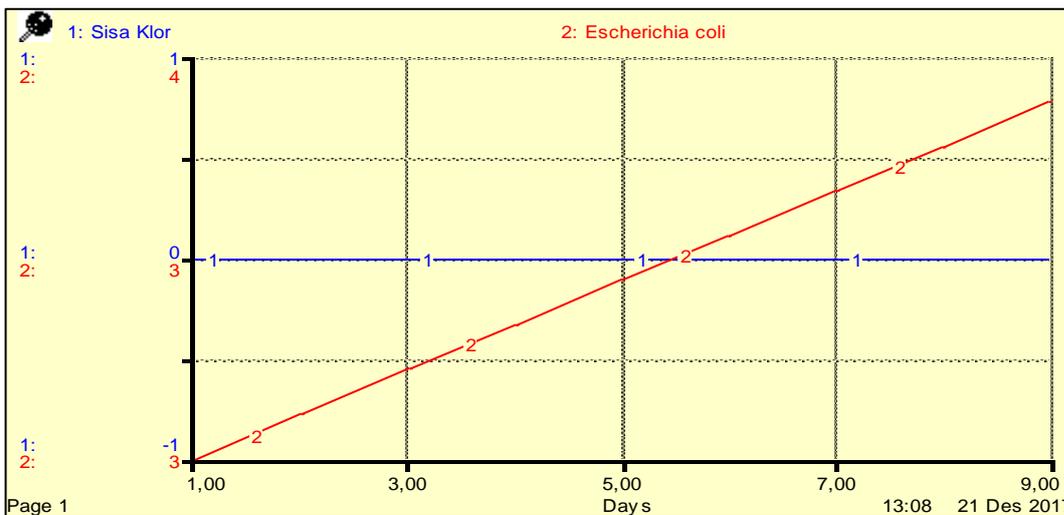
Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter

- Sisa klor dalam satuan mg/l

- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Pada jarak 7 km dengan 20% kebocoran pipa, sisa klor masih tersisa 0,10 mg/l sehingga tidak terdapat *Escherichia coli* di jaringan distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa sisa klor masih efektif sebagai desinfektan di jarak 7 km dengan kebocoran pipa sebesar 20%.

Gambar 4.17 dan Tabel 4.18 berikut menunjukkan hasil simulasi dari model untuk jarak 10 km dari reservoir.



Gambar 4.17 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (10 km)
(Hasil Analisa, 2017)

Keterangan: - Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Tabel 4.18 Hasil Simulasi Kualitas Air Pada Skenario Optimis (10 km)

Days	Jarak Distribusi	Sisa Klor	Escherichia coli
1	10.000	0,00	3
2	10.000	0,00	3
3	10.000	0,00	3
4	10.000	0,00	3
5	10.000	0,00	3
6	10.000	0,00	4
7	10.000	0,00	4
8	10.000	0,00	4
Final	10.000		4

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan: - Jarak distribusi dalam satuan meter
- Sisa klor dalam satuan mg/l
- *Escherichia coli* dalam satuan MPN/100 ml sampel

Walaupun tingkat kebocoran pipa yang diskenariokan merupakan kondisi yang optimum, yaitu 20%, sisa klor tetap habis pada jarak 10 km. Hal ini membuktikan bahwa sisa klor akan semakin menurun jika jarak distribusi semakin jauh.

Hal ini sesuai dengan penelitian Putri (2012) yang dilakukan di PDAM Nganjuk dimana konsentrasi sisa klor telah habis pada jarak 8 km dari reservoir. Syahputra (2012) dalam penelitiannya memperoleh nilai korelasi yang cukup kuat antara jarak distribusi air dengan konsentrasi sisa klor, yaitu sebesar -0,677. Hal ini diperkuat dengan penelitian Afrianita *et al* (2016) yang menunjukkan bahwa antara jarak distribusi dengan sisa klor dalam jaringan distribusi air minum memiliki nilai korelasi -0,634 yang berarti semakin jauh jarak distribusi maka konsentrasi sisa klor akan semakin berkurang.

Pengurangan konsentrasi sisa klor selama mengalir di dalam pipa dipengaruhi oleh 2 (dua) faktor yaitu, *bulk reaction* dan *pipe wall reaction*. *Bulk reaction* merupakan pengurangan konsentrasi sisa klor akibat sisa klor yang bereaksi dengan komponen-komponen yang terlarut dalam air, dapat berupa komponen organik maupun mikroorganisme dalam pipa. *Pipe wall reaction* merupakan pengurangan konsentrasi sisa klor akibat reaksi sisa klor dengan dinding pipa. Reaksi ini terjadi akibat terdapat lapisan *biofilm* yang terjadi karena korosi pada pipa (Triatmadja, 2006).

B. Kuantitas Air (Debit Air Distribusi)

Hasil simulasi untuk prediksi debit air hingga hari ke-9 ditunjukkan pada Tabel 4.19. Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.19, 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 5 km, 7 km, dan 10 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 4.19 Hasil Simulasi Debit Air Pada Skenario Optimis

Days	Debit Air Produksi	Debit Air Distribusi
1	0,86	0,69
2	0,86	0,69
3	0,87	0,70
4	0,99	0,79
5	0,89	0,71
6	0,95	0,76
7	0,99	0,79
8	0,99	0,79
Final	0,99	0,79

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Keterangan : - Debit air produksi dalam satuan m³/detik

- Debit air distribusi dalam satuan m³/detik

4.1.3 Perbandingan Antar Skenario

Setiap skenario dibandingkan hasil simulasinya berdasarkan parameter kualitas air berupa sisa klor dan *Escherichia coli* dan berdasarkan debit air. Tabel 4.20 berikut menunjukkan perbandingan kualitas 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 4.19 Perbandingan Kualitas Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis

Jarak Distribusi (m)	Hari ke-	Skenario Moderat/Kondisi Eksisting (25% Kebocoran Pipa)		Skenario Pesimis/Kondisi Ekstrim (50% Kebocoran Pipa)		Skenario Optimis/Kondisi Optimum (20% Kebocoran Pipa)	
		Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)
5000	1	0,15	0	0,00	0	0,16	0
	2	0,15	0	0,00	1	0,16	0
	3	0,15	0	0,00	1	0,16	0
	4	0,15	0	0,00	2	0,16	0
	5	0,15	0	0,00	3	0,16	0
	6	0,15	0	0,00	4	0,16	0
	7	0,15	0	0,00	4	0,16	0
	8	0,15	0	0,00	5	0,16	0
	9	0,15	0	0,00	6	0,16	0
7000	1	0,11	1	0,00	2	0,10	0
	2	0,11	1	0,00	3	0,10	0
	3	0,11	1	0,00	3	0,10	0
	4	0,11	1	0,00	4	0,10	0
	5	0,11	1	0,00	4	0,10	0
	6	0,11	1	0,00	5	0,10	0
	7	0,11	1	0,00	5	0,10	0
	8	0,11	1	0,00	6	0,10	0
	9	0,11	1	0,00	6	0,10	0

(Lanjutan) Tabel 4.19 Perbandingan Kualitas Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis

Jarak Distribusi (m)	Hari ke-	Skenario Moderat/Kondisi Eksisting (25% Kebocoran Pipa)		Skenario Pesimis/Kondisi Ekstrim (50% Kebocoran Pipa)		Skenario Optimis/Kondisi Optimum (20% Kebocoran Pipa)	
		Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)	Sisa Klor (mg/l)	<i>Escherichia coli</i> (MPN/100 ml sampel)
10000	1	0,00	25	0,00	25	0,00	3
	2	0,00	25	0,00	26	0,00	3
	3	0,00	25	0,00	26	0,00	3
	4	0,00	25	0,00	27	0,00	3
	5	0,00	26	0,00	27	0,00	2
	6	0,00	26	0,00	28	0,00	3
	7	0,00	26	0,00	28	0,00	4
	8	0,00	26	0,00	29	0,00	4
	9	0,00	26	0,00	29	0,00	4

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Berdasarkan 3 (tiga) skenario yang disimulasikan, pada skenario moderat yang merupakan kondisi eksisting dengan 20% kebocoran pipa menunjukkan *Escherichia coli* meningkat signifikan di jarak 10 km. Jumlah *Escherichia coli* yang mencapai 26 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 9 (sembilan) hari di jarak 5 km, 7 km, dan 10 km dapat menjadi variabel paling berpengaruh terhadap kualitas air, yaitu ditinjau dari parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 5 km sisa klor telah habis akibat adanya kebocoran pipa. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fuadi (2012) yang menyimpulkan bahwa jumlah *Escherichia coli* lebih dipengaruhi oleh kebocoran pipa daripada sisa klor. *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar 0,85 (kuat) terhadap kekeruhan yang diakibatkan oleh kebocoran pipa sedangkan antara sisa klor dengan *Escherichia coli* memiliki nilai korelasi sebesar -0,36 (lemah).

Pada kondisi optimum untuk 9 hari prediksi menunjukkan kondisi yang cukup baik pada jarak 5 km dan 7 km jika ditinjau dari kualitas air berdasarkan parameter *Escherichia coli* dan sisa klor. Pada jarak 7 km konsentrasi sisa klor sebesar 0,10 mg/l sehingga masih dapat mendesinfeksi mikroorganisme yang masuk akibat adanya kebocoran pipa. Namun, ketika jarak distribusi mencapai 10 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 memiliki nilai korelasi -0,634 yang berarti 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 4.21 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 4.21 Perbandingan Debit Air Pada Skenario Moderat, Skenario Pesimis, dan Skenario Optimis

Hari ke-	Debit Air Produksi (m ³ /s)	Debit Air Distribusi (m ³ /s)		
		Skenario Moderat/Kondisi Eksisting (25% Kebocoran Pipa)	Skenario Pesimis/Kondisi Ekstrem (50% Kebocoran Pipa)	Skenario Optimis/Kondisi Optimum (20% Kebocoran Pipa)
1.	0,86	0,65	0,43	0,69
2.	0,86	0,65	0,43	0,69
3.	0,87	0,65	0,44	0,70
4.	0,99	0,74	0,50	0,79
5.	0,89	0,67	0,45	0,71
6.	0,95	0,71	0,47	0,76
7.	0,99	0,74	0,50	0,79
8.	0,99	0,74	0,50	0,79
9.	0,99	0,74	0,50	0,79

Sumber: Hasil Analisa (2017)

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%.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.20, 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.

4.1.4 Manfaat Tiap Skenario Bagi PDAM Kota Surabaya

Berdasarkan hasil simulasi dan perbandingan antar skenario maka diketahui bahwa kebocoran pipa merupakan hal yang tidak bisa dihindari dan menjadi variabel penyebab peningkatan jumlah *Escherichia coli* di dalam sistem jaringan distribusi.

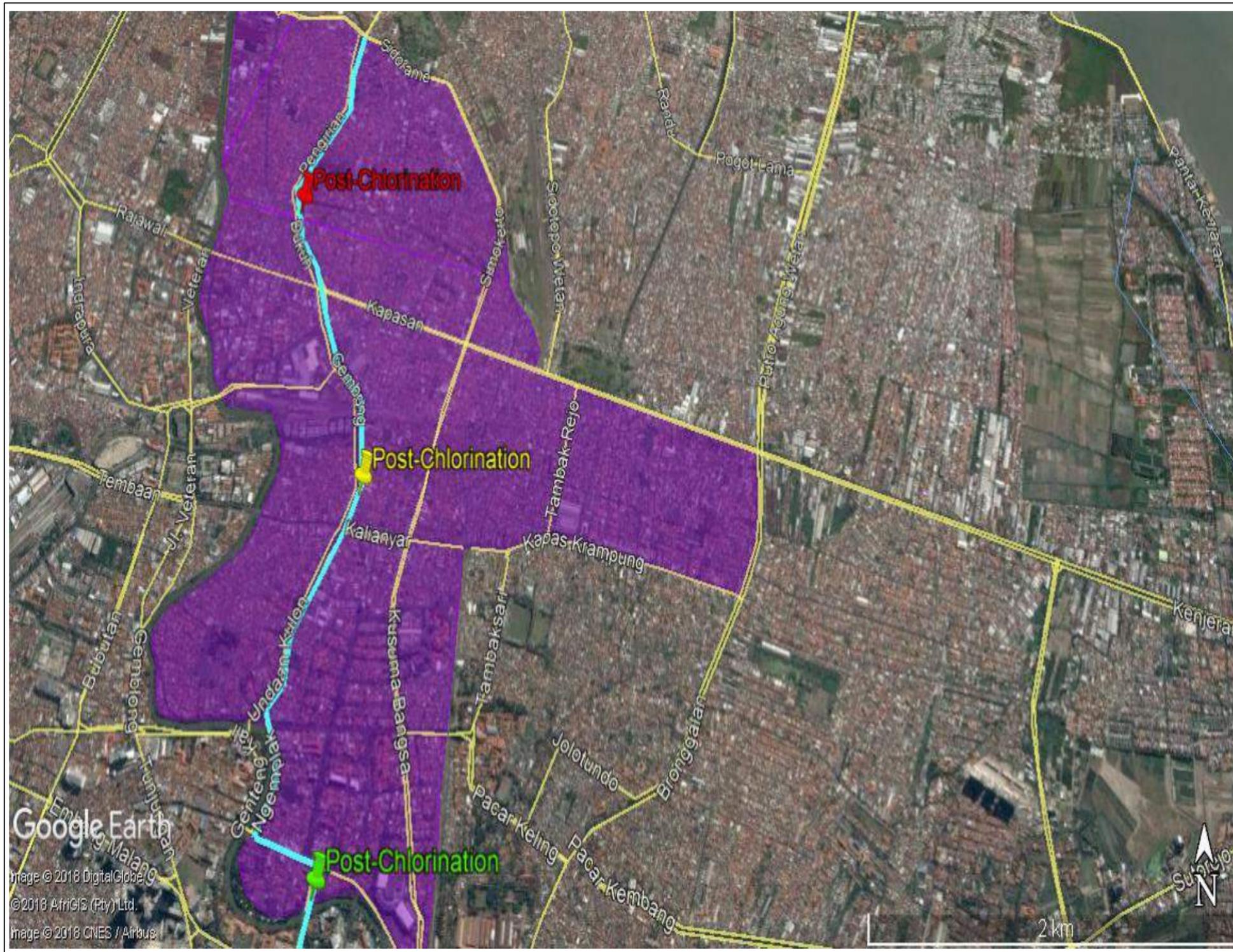
1. Skenario Moderat (Kondisi Eksisting)

Skenario ini menunjukkan bahwa kondisi jaringan distribusi IPAM Ngagel II saat ini memiliki tingkat kebocoran pipa sebesar 25%. Tingkat kebocoran pipa tersebut menyebabkan adanya *Escherichia coli* pada jarak 7 km sebesar 1 MPN/100 ml sampel dan meningkat menjadi 25 – 26 MPN/100 ml sampel pada jarak 10 km.

Dengan mengetahui hasil simulasi skenario moderat atau kondisi riil jaringan distribusi, pihak PDAM Surya Sembada, khususnya IPAM Ngagel II dapat melakukan langkah perbaikan kualitas air di jaringan distribusi yang terdeteksi menurun kualitas air distribusinya. Pihak PDAM dapat secara tepat mengetahui jarak jaringan distribusi dari reservoir yang memerlukan peningkatan kualitas air sehingga PDAM dapat memaksimalkan kinerja pelayanan terhadap kualitas air pelanggan.

Pada skenario moderat ini lokasi *post-chlorination* terletak di Jalan Pecindilan, sekitar 7 km dari reservoir IPAM Ngagel II, pada koordinat 7°14'49.60"S dan 112°44'51.13"T seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dimana titik lokasi *post-chlorination* disimbolkan dengan penunjuk warna kuning.

Halaman ini sengaja dikosongkan



 Institut Teknologi Sepuluh Nopember	
JUDUL PETA	
PETA LOKASI <i>POST-CHLORINATION</i> IPAM NGAGEL II KOTA SURABAYA	
KETERANGAN	
 <i>Post-Chlorination</i> di Skenario Moderat	
 <i>Post-Chlorination</i> di Skenario Pesimis	
 <i>Post-Chlorination</i> Di Skenario Optimis	
 Jaringan Pida Primer IPAM Ngagel II	
Sumber	Hasil Analisa (2017)
No. Gambar	4.18
	

Gambar 4.18 Peta Lokasi *Post-Chlorination* IPAM Ngagel II Kota Surabaya (Hasil Analisa, 2017)

1. Skenario Pesimis (Kondisi Ekstrim)

Skenario ini menunjukkan bahwa dengan tingkat kebocoran pipa mencapai 50% konsentrasi sisa klor pada jarak 5 km telah habis sehingga menyebabkan jumlah *Escherichia coli* terus mengalami peningkatan hingga mencapai 25 – 29 MPN/100 ml sampel di jarak 10 km.

Oleh karena angka kebocoran pipa yang digunakan pada skenario ini merupakan angka kebocoran pipa tertinggi yang terjadi di Indonesia maka PDAM Surya Sembada selaku pihak penanggung jawab sistem penyediaan air bersih di Surabaya dapat melakukan antisipasi terhadap kemungkinan penurunan kualitas air secara drastis akibat kondisi jaringan distribusi yang buruk.

Pada skenario pesimis ini lokasi *post-chlorination* terletak di Jalan Yos Sudarso, sekitar 5 km dari reservoir IPAM Ngagel II, pada koordinat 7°15'42.60"S dan 112°44'47.40"T seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dimana titik lokasi disimbolkan dengan penunjuk warna hijau.

2. Skenario Optimis (Kondisi Optimum)

Skenario ini menggambarkan ketika sistem jaringan distribusi berada pada kondisi yang baik dengan asumsi tingkat kebocoran pipa sebesar 20% yang merupakan standar nasional untuk indeks kebocoran pipa yang dikeluarkan oleh Dinas Pekerjaan Umum melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (KSNP-SPAM).

Pada kondisi ini sisa klor dapat bekerja secara efektif sebagai desinfektan pada jarak 5 km dan 7 km namun, pada jarak 10 km sisa klor telah habis sehingga menyebabkan adanya bakteri *Escherichia coli* sebesar 3 – 4 MPN/100 ml sampel. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun sistem jaringan distribusi PDAM berada pada kondisi yang baik, tetap diperlukan monitoring terhadap kualitas air distribusinya

Oleh karena itu, simulasi skenario optimis ini dapat menjadi acuan bagi pihak PDAM terhadap lokasi jaringan distribusi yang perlu pemeliharaan dan

penanganan terhadap kualitas air distribusinya sehingga ketika air berada di pelanggan kualitasnya masih terjaga.

Pada skenario optimis ini lokasi *post-chlorination* terletak di Jalan Pegirian, sekitar 8 km dari reservoir IPAM Ngagel II, pada koordinat $7^{\circ}14'5.95''\text{S}$ dan $112^{\circ}44'35.87''\text{T}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dimana titik lokasi disimbolkan dengan penunjuk warna merah.

4.2 Aspek Lingkungan

Berdasarkan simulasi pada aspek teknis maka dapat diketahui bahwa permasalahan yang dihadapi ketika terjadi kebocoran pipa adalah penurunan kualitas dan debit air di jaringan distribusi.

Berdasarkan hasil studi literatur, strategi dalam mengatasi permasalahan tersebut dinyatakan dalam 2 (dua) hal, yaitu:

1. Peningkatan Kualitas dan Debit Air Produksi

Strategi ini dilatar belakangi oleh adanya kecenderungan penurunan kualitas dan kuantitas air di pelanggan IPAM Ngagel II ketika skenario pesimis diterapkan dan penurunan kualitas dan kuantitas air di pelanggan yang terjauh dari IPAM Ngagel II ketika skenario optimis diterapkan. Dengan strategi ini diharapkan kualitas dan kuantitas air di pelanggan IPAM Ngagel II dapat memenuhi standar kesehatan dan standar kebutuhan air bagi masyarakat Kota Surabaya.

Strategi ini memiliki 2 (dua) sasaran. Pertama, pemeliharaan kualitas air produksi dengan langkah operasional berupa evaluasi kualitas air produksi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nugroho (2002) PDAM Surabaya relatif sering menghadapi penurunan kualitas air bersih yang tidak terduga pada musim kemarau. Selain itu, IPAM Ngagel II menggunakan air baku dari Kali Surabaya yang telah tercemar lebih dari 30 tahun sehingga perlu dilakukan monitoring kualitas air produksi. Penelitian yang dilakukan oleh Lassoued (2017) menunjukkan bahwa IPAM Ngagel yang salah satunya adalah IPAM Ngagel II

memiliki air produksi yang bersifat korosi. Sasaran kedua, yaitu pengembangan sumber-sumber air baku dengan langkah operasional investasi dalam pengembangan sumber air baku. Pengembangan sumber air baku ini dilakukan sebagai antisipasi permintaan air masyarakat ketika terjadi skenario pesimis. Sistem pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas sebagai sumber air baku IPAM Ngagel II sendiri dikelola oleh Perum Jasa Tirta sebagai upaya penyediaan dan peningkatan air baku di Surabaya. Sistem ini termasuk paling efisien di Indonesia dengan memanfaatkan air baku sekitar 50% dari kapasitas maksimumnya. PDAM Surya Sembada telah menargetkan untuk tahun 2018 akan meningkatkan kapasitas produksi instalasi sebesar 12.000 liter/detik sehingga menjadi 22.000 liter/detik. Selain itu, PDAM Surya Sembada juga akan membangun reservoir pompa-pompa *booster* di seluruh Surabaya sebagai upaya pengembangan.

2. Peningkatan Kualitas Air di Pelanggan

Strategi peningkatan kualitas air di pelanggan ini juga dilatar belakangi oleh adanya kecenderungan penurunan kualitas air di pelanggan IPAM Ngagel II ketika skenario pesimis diterapkan dan penurunan kualitas air di pelanggan yang terjauh dari IPAM Ngagel II ketika skenario optimis diterapkan. Penerapan strategi ini diharapkan dapat membantu dalam meningkatkan kualitas air di pelanggan IPAM Ngagel II ketika skenario tersebut terjadi sehingga memenuhi standar kesehatan berdasarkan peraturan menteri kesehatan Indonesia. Strategi kedua ini memiliki 2 (dua) sasaran, yaitu pertama, pemeliharaan jaringan distribusi dengan langkah operasional perawatan sambungan pipa. Perawatan hanya dilakukan pada sambungan pipa karena menurut PDAM Surya Sembada pipa-pipa yang digunakan masih dalam kondisi prima meskipun jaringan perpipaan dalam kondisi tua. Menurut Fontana (1986) pengaruh lingkungan pada pipa yang korosif dapat memperpendek umur pipa jika tidak dilakukan perawatan. Korosi pada pipa dapat menyebabkan terbentuknya lapisan *biofilm* yang akan mempengaruhi konsentrasi sisa klor di jaringan distribusi. Menurut data PDAM

(2017) perawatan sambungan pipa saat ini telah mencapai 44 km/tahun. Perawatan tersebut direncanakan 100 km dalam setahun sehingga rencana perawatan sambungan pipa yang mencapai 6000 km dapat terealisasi dalam jangka waktu 60 tahun.

Kedua, pemeliharaan kualitas air di jaringan distribusi dengan langkah operasional pembangunan pos desinfeksi. Kualitas air yang menjadi standar pada jaringan distribusi adalah sisa klor dan jumlah *Escherichia coli*. Berdasarkan hasil simulasi dapat diketahui bahwa wilayah pelayanan IPAM Ngagel II perlu penambahan pembubuhan desinfektan ketika jarak distribusi mencapai lebih dari 7 km. Pada kondisi optimum dari jaringan distribusi dengan 20% kebocoran pipa pembubuhan desinfektan perlu dilakukan pada jarak 7 km.

Pembubuhan desinfeksi tersebut dilakukan secara konsisten di jaringan distribusi untuk membantu meminimalisir kekurangan klor di pelanggan terjauh (jarak lebih dari 7 km). Desinfeksi dilakukan dengan menggunakan pos desinfeksi yang dapat dibangun ketika jarak distribusi mencapai 7 km, yaitu berada di sekitar Jalan Gembong pada zona 306 wilayah pelayanan PDAM Surya Sembada Kota Surabaya.

Desinfektan yang digunakan adalah klor cair dalam tangki bertekanan yang memiliki 98,6% Cl_2 yang dikemas dalam kontainer 100 kg atau 1000 kg. Jenis ini tidak membutuhkan ruangan yang besar untuk penyimpanan namun, tidak dapat disimpan terlalu lama karena konsentrasi klor aktif akan menurun sekitar 3 - 5% per tahun. Efektivitas sebagai desinfektan ditentukan oleh pH air dimana pH yang optimum adalah 5,5 – 7,5 dengan tingkat efisiensi yang tinggi karena injeksi dilakukan secara tertutup dan langsung ke dalam air. Laju reaksi dengan bakteri lebih cepat dan lebih reaktif dibandingkan klorin dioksida dan khloramin. Waktu kontak dengan *Escherichia coli* sekitar 3 - 4 menit (PDAM, 2017).

Penggunaan gas klor sebagai desinfektan dengan membangun pos desinfeksi memerlukan tenaga operator yang sedikit dan hanya bertugas memonitoring proses injeksi. Peralatan yang dibutuhkan juga relatif sederhana

karena hanya membutuhkan tangki gas klor namun, biaya investasi awal relatif mahal.

Adapun peralatan yang dibutuhkan di pos desinfeksi dengan menggunakan gas klor sebagai desinfektan adalah sebagai berikut.

1. *Gas Feeder*

Gas Feeder merupakan alat yang digunakan untuk mengatur keluarnya klor cair dari tabung gas klor. Gas yang sering digunakan adalah *Advance Gas Feeder*. Berikut Gambar 4.19 yang merupakan contoh klorinator yang digunakan dalam sistem desinfeksi gas klor.



Gambar 4.19 *Gas Feeder* untuk Proses Desinfeksi Gas Klor (PDAM, 2017)

2. Tabung Gas Klor

Tabung gas klor berisi gas klor yang dicairkan. Injeksi klor dari tabung gas klor ke dalam pipa *feeding* atau pipa air yang ditarik dengan pompa booster diatur lajunya (ppm) oleh *gas feeder*. Gambar 4.20 adalah contoh tabung gas klor pada pos desinfeksi.



Gambar 4.20 Tabung Gas Klor dan *Gas Feeder* (PDAM, 2017)

3. *Booster Pump*

Bertujuan untuk mengambil air dari pipa distribusi untuk diinjeksikan desinfektan. *Booster pump* yang paling sering digunakan dan direkomendasikan adalah Grundfos. Gambar 4.21 adalah contoh pompa *booster* yang dapat digunakan dengan debit 3 m³/jam.



Gambar 4.21 Pompa *Booster* (PDAM, 2017)

4. *Handling and Storage*

Perlu adanya ruang khusus dengan 2 (dua) sekat. Ruang pertama untuk proses pembubuhan atau injeksi sedangkan ruang kedua untuk penyimpanan gas klor.

4.3 Aspek Finansial

Analisis kelayakan finansial memiliki beberapa indikator sebagai dasar penilaian layak tidaknya suatu usaha untuk dijalankan. Apakah usaha tersebut jika dijalankan akan menghasilkan keuntungan (*benefit*), seimbang (keuntungan dan modal sama), atau hanya menghasilkan kerugian.

Analisis yang dilakukan ditunjukkan untuk usaha jangka panjang karena pengembangan kualitas dan debit air distribusi IPAM Ngagel II merupakan usaha yang telah menjual hasil produksi dan jasa pada konsumen lebih dari satu tahun.

1. Biaya Investasi

Biaya investasi pelaksanaan pengembangan jaringan distribusi IPAM Ngagel II untuk jangka waktu 20 tahun dapat dilihat pada Tabel 4.22 berikut.

Tabel 4.22 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Investasi

No.	Uraian	Jumlah (Rp)
1.	Penambahan kapasitas reservoir pompa untuk peningkatan debit air produksi sebesar 1100 liter/detik	20.000.000.000,-
2.	Peralatan pos desinfeksi: 1) <i>Gas Feeder/Injector Advance, chlorine feeder up to 0,5 kg/jam, 2 buah @ Rp. 15.000.000,-</i> 2) <i>Booster Pump, 60 liter/menit, 8 buah @ Rp. 10.000.000,-</i> 3) Pemasangan (instalasi) termasuk aksesoris @ Rp. 5.000.000,- 4) <i>Handling dan storage room @ Rp. 10.000.000,-</i>	125.000.000,-
Total		20.125.000.000,-

Sumber: Studi Literatur (2017)

Berdasarkan Tabel 4.21 tersebut maka dapat diketahui total biaya investasi proyek pengembangan jaringan distribusi adalah sebesar Rp. 20.125.000.000,-

2. Biaya Operasional

Data ini berupa biaya yang dikeluarkan tiap tahunnya untuk operasional teknis dan non teknis, dengan asumsi bahwa biaya produksi tidak termasuk dalam biaya operasional. Data biaya operasional dapat dilihat pada Tabel 4.23 berikut:

Tabel 4.23 Biaya Operasional IPAM Ngagel II per Tahun

No.	Uraian	Jumlah (Rp)
1.	Anggaran PDAM untuk operasional aliran air 2200 liter/detik, Rp. 50.000.000 /bulan	600.000.000,-
2.	Perawatan sambungan pipa 20 km/tahun untuk pemeliharaan jaringan distribusi	15.000.000.000,-
3.	Pos Desinfeksi: 1) Klor cair, 4,9 kg/hari x 360 hari x Rp 2000/kg = Rp. 3.528.000,- 2) Konsumsi energi listrik pompa <i>booster</i> dengan asumsi 300 watt, Rp 5000/Kwh = Rp. 155.520.000,- 3) Biaya Pemeliharaan = Rp. 5.000.000,- 4) Biaya Penyusutan = Rp. 2.000.000,-	159.055.000,-
Total		15.759.055.000,-

Sumber: PDAM (2017)

3. Data Pendapatan

Data pendapatan diperoleh dari perkiraan laba bersih pemakaian air oleh pelanggan IPAM Ngagel II akibat pengembangan jaringan distribusi.

Dengan asumsi:

- Tambahan ketersediaan air adalah 1200 liter/detik atau 1,2 m³/detik.

- Jumlah pelanggan baru yang diharapkan adalah 475.200 orang.
- Penggunaan air PDAM di Surabaya mencapai 200 liter/orang/hari atau 0,2 m³/orang/hari sehingga menjadi 6 m³/orang/bulan.
- Pelanggan merupakan kelompok pelanggan II dengan penggunaan air 0 - 10 m³ (Lampiran 4).
- Perhitungan menggunakan harga 10 m³ pertama, yaitu Rp. 350,- sehingga harga pemakaian air sebesar Rp. 3.500,- (Lampiran 4).
- Harga sewa meter Rp. 2.400,- dengan PPN sewa meter sebesar Rp. 240,-

Sehingga besaran laba bersih tahunan IPAM Ngagel II dari pemakaian air pelanggan dapat dilihat pada Tabel 4.24 berikut:

Tabel 4.24 Asumsi Perhitungan Laba Bersih IPAM Ngagel II

Tahun Ke-	Jumlah Pelanggan (orang)	Penggunaan Air (m ³ /orang/bulan)	Harga Pemakaian Air (rupiah/bulan)	Sewa Meter dan PPN (rupiah/bulan)	Laba Bersih IPAM Ngagel II/tahun (rupiah)
1	237.600	6	831.600.000,-	2.640,-	9.979.231.680,-
2	356.400	6	1.247.400.000,-	2.640,-	14.968.831.680,-
3	475.200	6	1.663.200.000,-	2.640,-	19.958.431.680,-

Sumber: Hasil Analisa (2017)

4. Ketersediaan Air IPAM Ngagel II

Kapasitas produksi air IPAM Ngagel II sebesar 1000 liter/detik yang akan ditingkatkan menjadi 2200 liter/detik untuk perhitungan pemakaian jangka panjang. Hal ini dikarenakan berdasarkan data PDAM Surya Sembada Kota Surabaya, penggunaan air PDAM di Surabaya mencapai 190 – 200 liter/orang/hari, lebih besar dari pemakaian rata-rata air pelanggan PDAM untuk kota besar, yaitu 140 liter/orang/hari sedangkan PDAM Surya Sembada juga menghadapi permasalahan kebocoran pipa.

5. Rencana Pengembangan Jaringan Distribusi IPAM Ngagel II

Pengembangan jaringan distribusi IPAM Ngagel II dilakukan oleh PDAM Surya Sembada Kota Surabaya untuk rencana investasi selama 20 tahun terhitung dari tahun 2017 hingga 2037.

6. Suku Bunga Pinjaman Bank Indonesia

Data suku bunga bank digunakan dalam perhitungan dari tahun pertama pengoperasian hingga akhir umur ekonomis dimana nilai suku bunga diperoleh dari data yang dikeluarkan oleh Bank Indonesia per 21 Juli 2016 dengan tingkat besaran suku bunga sebesar 6,50%.

Dalam menganalisis aspek finansial dengan data – data diatas digunakan 4 (empat) indikator utama, yaitu:

1. *Net Present Value* (NPV)

Indikator *Net Present Value* bertujuan untuk menghitung selisih antara aspek manfaat (*benefit*) dengan aspek biaya (*cost*) terhadap nilai sekarang (*present*). Konsep kesamaan nilai uang terhadap waktu menggunakan suku bunga pinjaman dari Bank Indonesia (*i*) dengan nilai 6,50%.

Untuk mendapatkan *Benefit Present Value* digunakan persamaan:

$$BPV = \sum_{t=0}^n \frac{Benefit}{(1+i)^t}$$

Dengan menggunakan persamaan diatas maka diperoleh Tabel 4.25 yang merupakan rekapitulasi untuk perhitungan *Benefit Present Value*.

Tabel 4.25 Rekapitulasi *Benefit* dan *Benefit Present Value*

Biaya Investasi	Rp. 20.125.000.000,-	
Suku Bunga	6,50%	
Tahun Ke-	Arus Kas Masuk/ <i>Benefit</i> (Rp)	<i>Benefit Present Value</i> (Rp)
0	-20.125.000.000,-	-20.125.000.000,-
1	9.979.231.680,-	9.370.170.592,-
2	14.968.831.680,-	13.197.409.403,-
3	19.958.431.680,-	16.522.569.540,-
4	19.958.431.680,-	15.514.149.803,-
5	19.958.431.680,-	14.567.276.810,-
6	19.958.431.680,-	13.678.194.188,-
7	19.958.431.680,-	12.843.374.824,-
8	19.958.431.680,-	12.059.506.877,-
9	19.958.431.680,-	11.323.480.636,-
10	19.958.431.680,-	10.632.376.184,-
11	19.958.431.680,-	9.983.451.816,-
12	19.958.431.680,-	9.374.133.161,-
13	19.958.431.680,-	8.802.002.968,-
14	19.958.431.680,-	8.264.791.519,-
15	19.958.431.680,-	7.760.367.623,-
16	19.958.431.680,-	7.286.730.163,-
17	19.958.431.680,-	6.842.000.153,-
18	19.958.431.680,-	6.424.413.289,-
19	19.958.431.680,-	6.032.312.948,-
20	19.958.431.680,-	5.664.143.613,-
	Total	206.142.856.110,-

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Berdasarkan Tabel 4.25 diatas maka dapat diketahui besaran nilai *Net Present Value* (NPV) pada penelitian ini, yaitu:

$$\begin{aligned}
 NPV &= \text{Total } \textit{Benefit Present Value} - \text{Total } \textit{Present Value} \text{ Investasi} \\
 &= 206.142.856.110 - 20.125.000.000 \\
 NPV &= 186.017.856.110
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan nilai NPV diperoleh Rp. 186.017.856.110,-. Oleh karena nilai $NPV > 0$ maka **proyek layak dibangun**.

2. *Benefit Cost Ratio* (BCR)

Nilai *Benefit Cost Ratio* (BCR) diperoleh dari perbandingan total pendapatan (*Benefit*) yang dihasilkan dengan total pengeluaran (*Cost*) yang menggunakan nilai sekarang (*present*). Persamaan yang digunakan, yaitu:

$$BCR = \frac{(\textit{Benefit Present Value})}{(\textit{Cost Present Value})}$$

Untuk memperoleh nilai *Cost Present Value* digunakan persamaan:

$$CPV = \sum_{t=0}^n \frac{\textit{Cost}}{(1+i)^t}$$

Sehingga dengan menggunakan persamaan diatas maka diperoleh Tabel 4.26 untuk rekapitulasi nilai *Cost Present Value*.

Tabel 4.26 Rekapitulasi *Cost* dan *Cost Present Value*

Biaya Investasi	Rp. 20.125.000.000,-	
Biaya Operasional	Rp. 15.759.055.000,-	
Suku Bunga	6,50%	
Tahun Ke-	Arus Kas Keluar/ <i>Cost</i> (Rp)	<i>Cost Present Value</i> (Rp)
0	20.125.000.000,-	20.125.000.000,-
1	15.759.055.000,-	9.550.942.424,-

(Lanjutan) Tabel 4.26 Rekapitulasi *Cost* dan *Cost Present Value*

Tahun Ke-	Arus Kas Keluar/ <i>Cost</i> (Rp)	<i>Cost Present Value</i> (Rp)
2	15.759.055.000,-	5.788.449.954,-
3	15.759.055.000,-	3.508.151.487,-
4	15.759.055.000,-	2.126.152.417,-
5	15.759.055.000,-	1.288.577.222,-
6	15.759.055.000,-	780.955.892,-
7	15.759.055.000,-	473.306.601,-
8	15.759.055.000,-	286.852.486,-
9	15.759.055.000,-	173.849.991,-
10	15.759.055.000,-	105.363.631,-
11	15.759.055.000,-	63.856.746,-
12	15.759.055.000,-	38.701.058,-
13	15.759.055.000,-	23.455.187,-
14	15.759.055.000,-	14.215.265,-
15	15.759.055.000,-	8.615.312,-
16	15.759.055.000,-	5.221.401,-
17	15.759.055.000,-	3.164.486,-
18	15.759.055.000,-	1.917.870,-
19	15.759.055.000,-	1.162.345,-
20	15.759.055.000,-	704.452,-
Total		36.440.585.925,-

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Berdasarkan Tabel 4.26 diatas maka dapat diketahui besaran nilai *Benefit Cost Ratio* (BCR) pada penelitian ini, yaitu:

$$BCR = \frac{(\textit{Benefit Present Value})}{(\textit{Cost Present Value})}$$

$$BCR = \frac{206.142.856.110}{36.440.585.925}$$

BCR = 5,66 dengan kata lain BCR > 1 maka proyek **layak dibangun**.

3. *Internal Rate Return (IRR)*

Internal Rate Return (IRR) adalah arus pengembalian yang menghasilkan NPV aliran kas masuk dikurangi NPV aliran kas keluar. Pada metode NPV dilakukan dengan menentukan terlebih dahulu besar arus pengembalian kemudian dihitung nilai laba bersih dari aliran kas keluar dan masuk (Soeharto, 1997). Berikut Tabel 4.27 yang merupakan perhitungan *trial and error* untuk nilai IRR pada penelitian ini.

Tabel 4.27 Perhitungan *Trial and Error* untuk IRR

Tahun ke-	DF 6%	<i>Present Value</i> 6% (Rp)	DF 7%	<i>Present Value</i> 7% (Rp)
1.	0,94	5.134.944.457,-	0,93	5.158.346.810,-
2.	0,89	4.190.500.846,-	0,87	4.264.900.634,-
3.	0,84	3.205.845.231,-	0,82	3.330.927.544,-
4.	0,79	1.935.011.698,-	0,76	2.066.428.670,-
5.	0,75	1.225.578.148,-	0,71	1.353.184.818,-
6.	0,70	812.531.897,-	0,67	932.268.943,-
7.	0,67	562.499.923,-	0,62	673.543.378,-
8.	0,63	405.644.421,-	0,58	508.691.620,-
9.	0,59	304.010.189,-	0,54	400.376.411,-
10.	0,56	236.238.987,-	0,51	327.421.485,-
11.	0,53	189.916.099,-	0,48	277.404.593,-
12.	0,50	157.605.534,-	0,44	242.815.793,-
13.	0,47	134.729.218,-	0,41	218.995.176,-
14.	0,44	118.397.872,-	0,39	202.989.939,-
15.	0,42	106.748.111,-	0,36	192.902.051,-

(Lanjutan) Tabel 4.27 Perhitungan *Trial and Error* untuk IRR

Tahun ke-	DF 6%	Present Value 6% (Rp)	DF 7%	Present Value 7% (Rp)
16.	0,39	98.556.537,-	0,34	187.505.761,-
17.	0,37	93.009.541,-	0,32	186.017.824,-
18.	0,35	89.562.886,-	0,30	187.956.464,-
29.	0,33	87.854.300,-	0,28	193.053.190,-
20	0,31	87.648.115,-	0,26	201.196.794,-
Total PV		19.176.834.009,-	Total PV	21.106.927.899,-
NPV		-948.165.991,-	NPV	981.927.899,-

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Berdasarkan Tabel 4.27 maka selanjutnya dilakukan perhitungan interpolasi seperti pada Tabel 4.28 berikut:

Tabel 4.28 Perhitungan Interpolasi

Selisih Diskon Faktor (DF)	Selisih Total PV (Rp)	Selisih PV dengan Investasi Awal (Rp)
7%	21.106.927.899,-	21.106.927.899,-
6%	19.176.834.009,-	20.125.000.000,-
1%	1.930.093.890,-	981.927.899,-

Sumber: Hasil Analisa (2017)

Berdasarkan Tabel 4.27 diatas maka untuk mengetahui nilai *Internal Rate Return* (IRR) dilakukan perhitungan sebagai berikut.

$$IRR = r_1 + (r_2 - r_1) \times \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2}$$

$$IRR = 7 + (1) \times \frac{981.927.899}{1.930.093.890}$$

$$IRR = 7,51\%$$

Oleh karena $IRR > 7\%$ maka kelayakan investasi untuk pengembangan jaringan IPAM Ngagel II **layak untuk dilaksanakan**.

4. *Payback Periode (PP)*

Periode pengembalian adalah jangka waktu yang diperlukan untuk pengembalian modal investasi yang dihitung dari aliran laba bersih (Soeharto, 1997). Oleh karena arus kas masuk per tahun jumlahnya sama maka digunakan perhitungan PP sebagai berikut:

$$\text{Payback Periode (PP)} = \frac{(\text{Biaya Investasi})}{(\text{Benefit})} \times 1 \text{ tahun}$$

$$\text{Payback Periode (PP)} = \frac{(20.125.000.000)}{(19.958.431.680)} \times 1 \text{ tahun}$$

$$\text{Payback Periode (PP)} = 1,27$$

Jadi, periode pengembalian modal investasi adalah **1 tahun 3 bulan**.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai persentase kebocoran pipa menjadi variabel utama terhadap penurunan kualitas air di jaringan distribusi PDAM Surya Sembada Kota Surabaya.
2. Hasil simulasi pada skenario pesimis dan skenario optimis menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat kebocoran pipa maka semakin dekat jarak *post-chlorination* dari instalasi pengolahan air.
3. Berdasarkan aspek lingkungan, strategi yang dapat diterapkan dinyatakan dalam 2 (dua) hal, yaitu peningkatan kualitas dan debit air produksi serta peningkatan kualitas air di pelanggan. Berdasarkan kajian aspek kelayakan finansial dengan indikator *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate Return* (IRR) dan *Payback Periode* (PP), pengembangan jaringan distribusi IPAM Ngagel II layak untuk dilaksanakan.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut diharapkan penambahan jumlah variabel yang mempengaruhi jaringan distribusi PDAM seperti tekanan, *bulk reaction* dan *pipe wall*, umur pipa, dan jenis pipa agar hasil simulasi dapat lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- AFNOR (Association Française de Normalisation), (1990), *Eaux Méthodes d'essais : Recueil de Normes Françaises*, Fourth Edition, La De'fense, Paris.
- Afrianita, R., Komala, P. S. dan Andriani, 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, Padang.
- Alaerts dan Santika, S., (1987), *Metode Penelitian Air*, Usaha Nasional, Surabaya.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), AEF, (1998), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Twentieth Edition, Washington DC.
- Andhika, D. J. D., Trijoko, Hanani, Y., (2013), "Kadar Sisa Chlor dan Kandungan Bakteri E. Coli Perusahaan Air Minum Tirta Moedal Semarang Sebelum dan Sesudah Pengolahan", *Jurnal Kesehatan Masyarakat 2013*, Vol. 2, No. 2.
- Anggraini, W., Riduan, R., dan Firmansyah, M., (2017), *Evaluasi Sisa Klor Jaringan Distribusi Zona Air Minum Prima (ZAMP) PDAM Intan Banjar Menggunakan EPANET 2.0*, Skripsi, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru.
- Asryadin, Juliana, C., Soedarjo, (2012), "Pengaruh Jarak Tempuh Air dari Unit Pengolahan Air Terhadap pH, Suhu, Kadar Sisa Klor, dan Angka Lempeng Total Bakteri (ALTB) Pada PDAM Kota Bima Nusa Tenggara Barat", *Analisis Kesehatan Sains*, Vol. 01, Hal. 47-52.
- Azwar, A., (1979), *Pengantar Ilmu Kesehatan Lingkungan*, PT. Mutiara Sumber Widya, Jakarta.

- Barlas, Y., (1996), *Multiple Test for Validation of Systems Dynamics Type of Simulation Model*, Turkey.
- Chandra, B., (2007), *Pengantar Kesehatan Lingkungan*, Buku Kedokteran EGS, Jakarta.
- Clark, R. M., Geldreich, E. E., Fox, K. R., Rice, E. W., Johnson, C. H., Goodrich, J. A., Barnick, J. A., dan Abdesaken, F., (1996), *Tracking a Salmonella Serovar Typhimurium Outbreak in Gideon, Missouri: Role of Contaminant Propagation Modelling*, J. Water SRT-Aqua.
- Daud, A., (2001), *Dasar-Dasar Kesehatan Lingkungan*, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Dimiyati dan Mudjiono, (2002), *Belajar dan Pembelajaran*, Rineka Cipta dan Depdikbud, Jakarta.
- Dinas Pekerjaan Umum, (2006), *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (KSNP-SPAM)*, Dinas PU, Jakarta.
- Edward, R. A., Fleet, G. H. and Wootton, M., (1987), *Food commodity science: A Course Manual in Food Science*, Australian Vicechancellors Committee Watson Ferguson and Co, Brisbane.
- Fardiaz, S., (1992), *Mikrobiologi Pangan 1*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Fardiaz, S., (1989), *Mikrobiologi Pangan*, Pusat Antar Universitas Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Garcia, V. J., Garcia, C., Gomez, J. A., Garcia, M. P., dan Ardanuy, R., (1997), "Formation, Evolution, and Modelling of Trihalomethanes in the Drinking Water of A Town: II. In The Distribution System", *Water Research*, Vol. 31, hal. 1405-1413.

- Heim, T. H., Dietrich, A. M., (2006), *Sensory Aspects And Water Quality Impacts Of Chlorinated And Chloraminated Drinking Water In Contact With HDPE And PVC Pipe*, Water Res. 41, hal. 757-764.
- Hunaidi, O., (2000), "Detecting Leaks in Water Distribution Pipes. Institute for Research in Construction", *Construction Technology Update 40*, hal. 1-6.
- Jawetz, E., Melnick, J. L., Adelberg, E. A., Brooks, G. F., Butel, J. S., dan Ornston, L. N., (1994), *Mikrobiologi Kedokteran*, Twentieth Edition, University of California, San Francisco.
- Jay, J. M., (1992), *Modern Food Microbiology*, Fourth Edition, Chapman and Hall, New York.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, (2015), *Rencana Strategis Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Tahun 2015-2019*, Badan Pengembangan Infrastruktur Wilayah, Jakarta.
- Khairunnisa, C., (2012), *Pengaruh Jarak dan Konstruksi Sumur serta Tindakan Pengguna Air Terhadap Jumlah Coliform Air Sumur Gali Penduduk di Sekitar Pasar Hewan Desa Cempeudak Kecamatan Tanah Jambo Aye Kabupaten Aceh Utara Tahun 2012*, Tesis, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Lassoued, M., (2017), *Gambaran Umum Pengoperasian IPAM Ngagel Berdasarkan Efisiensi Kualitas dan Stabilitas Air*, Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Lehtola, M.S., Miettinen, I.T., Lampola, T., Hiruonen, A., Vartiainen, T., Martikainen, P.J., (2004), *Pipeline Materials Modify The Effectiveness Of Disinfectants In Drinking Water Distribution Systems*, Water Res. 39, hal. 1962–1971.

- Lubis, P., S., (2013), *Pengaruh Rasio Keuangan dalam Memprediksi Return Saham pada Perusahaan Real Estate dan Properti yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia*, Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Lynch, J. M. dan Poole, N. J., (1979), *Microbial Ecology A Conceptual Approach*, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Masduqi, A. dan Assomadi, A. F., (2016), *Operasi dan Proses Pengolahan Air*, Second Edition, ITS Press, Surabaya.
- McFeters, G. A., Kippin, J. S., LeChevallier, M. W., (1986). *Injured Coliforms in Drinking Water*, Appl. Environ. Microbiol.
- Menteri Kesehatan Republik Indonesia, (2010), *Peraturan Menteri Kesehatan No. 736/Menkes/PER/VI/2010 tentang Tata Laksana Pengawasan Kualitas Air Minum*, Kementerian Kesehatan, Jakarta.
- Menteri Kesehatan Republik Indonesia, (2010), *Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/Menkes/SK/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum*, Kementerian Kesehatan, Jakarta.
- Mubawadi, T., (2016), *Hubungan Suhu, pH dan Sisa Klor dengan Keberadaan Escherichia Coli Diaregenik dalam Air PDAM Di Wilayah Padat Penduduk Kota Surabaya*, Tesis, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Pal R., Rai B.B., Kar S., (2010), “Solar Disinfection Improves Drinking Water Quality to Prevent Diarrhea in Under-Five Children in Sikkim”, *Journal of Global Infectious Diseases*, Vol. 2, No. 3, hal. 221-225.
- Perusahaan Daerah Air Minum, (2017), “Kualitas Air Jaringan Distribusi Eksisting”, PDAM, Surabaya.
- Perusahaan Daerah Air Minum, (2017), “Kualitas Air Produksi Instalasi Pengolahan Air Ngagel II”, PDAM, Surabaya.

- Putri, F.H., (2012), *Pengaruh Jarak Distribusi Air Terhadap Kadar Sisa Klor, Jumlah E. Coli dan MPN Coliform Pada Jaringan Distribusi Air PDAM Kabupaten Nganjuk*, Skripsi, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Retnowati, (2015), *Korelasi Antara Kadar Klor dengan Kadar Bakteri E. Coli dalam Air Minum Produksi PDAM di Kotamadya Surabaya*, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Said, N. I., (2009), *Disinfeksi untuk Proses Pengolahan Air Minum*, Pusat Teknologi Lingkungan BPPT, Jakarta.
- Saysel, A. K., and Barlas, Y., (2001), "A Dynamic Model of Salinization on Irrigated Lands", *Ecological Modelling*, 139, hal. 177-179.
- Soemirat, J., (2006), *Kesehatan Lingkungan*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Soeharto, I., (1997), *Manajemen Proyek*, Erlangga, Jakarta.
- Sterman, John D., (2000), *Business Dynamics; System Thinking and Modeling for a Complex World*, International Edition: McGraw-Hill, Singapore.
- Subdirektorat Sistem Penyediaan Air Minum Khusus Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, (2016), *Akses Air Minum Masyarakat*, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- Subdirektorat Statistik Kesehatan dan Perumahan, (2016), *Mewujudkan Aksesibilitas Air Minum dan Sanitasi yang Aman dan Berkelanjutan Bagi Semua : Hasil Survei Kualitas Air di Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2015*, Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Sugiarti, A., Yuliani, E., Prasetyorini, L., (2014), *Analisis Pengaruh Jarak Pengaliran, pH, Suhu, Tekanan, dan Kandungan Besi terhadap Konsentrasi Sisa Klorin dan Koloni Koliform Pada Sumber Air Wadit PDAM Kota Malang*, Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang.

- Supardi dan Sukamto, (1999), *Mikrobiologi Dalam Pengolahan Dan Keamanan Produk Pangan*, Penerbit Alumni, Bandung.
- Syahputra, B., (2012), “Analisa Sisa Chlor Pada Jaringan Distribusi Ai Minum PDAM Kota Semarang”, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Ke-3*, Eds: Kusumo, Priyono et al., Universitas Wahid Hasyim, Semarang, hal. A1-A5.
- Tasrif, M., (2007), *Analisis Kebijakan Menggunakan Model Sistem Dinamik*, Buku 2: Modul Kuliah/Kursus, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Triatmadja, R., (2006), *Pra Analisa Pada Jaringan Pipa Untuk Meningkatkan Kecepatan Komputasi*, Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Winardi, (1989), *Pengantar Tentang Teori Sistem dan Analisis Sistem*, Mandar Maju, Bandung.
- World Health Organization, (2011), *Guidelines For Drinking-water Quality*, Fourth Edition, WHO, Geneva.

Lampiran 1

Hasil Pengujian Kualitas Air Produksi Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Ngagel II

No.	Parameter	Satuan	Metode Uji	Standar Permenkes RI No. 492 Tahun 2010	Hasil Analisa Tahun 2014	Hasil Analisa Tahun 2015	Hasil Analisa Tahun 2016
1.	Suhu	°C	SNI 06-6989.23-2005	Suhu udara \pm 3°C	27,19	26,96	26,89
2.	Kekeruhan	Skala NTU	IK-5.4.1-1	5	5	0,86	0,8
3.	pH	-	SNI 06-6989.23-2005	6,5-8,5	7,17	7,28	7,2
4.	Total Coli	MPN/100 ml	SNI 19-3957-1995	0	0	0	0
5.	Fekal Coli	MPN/100 ml	SNI 06-4158-1996	0	0	0	0
6.	TDS	mg/l	SNI 06-6989.27-2005	500	245	268,7	242,48
7.	Warna	TCU	SNI 6989.80.2011	15	4,3	4,65	5,45
8.	Amoniak	mg/l NH ₃	SNI 01-2554-1999 butir 12	1,5	0,08	0,07	0,1
9.	Nitrit	mg/l NO ₂	APHA 4500-NO ₂ -B-2005	3	0,01	0	0,01
10.	Nitrat	mg/l NO ₃	SNI 19-1661-1989	50	3,63	4,75	4,04
11.	Klorida	mg/l Cl	SNI 6989.19-2009	250	31,99	31,66	27,41
12.	Sulfat	mg/l SO ₄	SNI 01-3554-2006 butir 2.11	250	49,46	41,46	63,36

(Lanjutan) Hasil Pengujian Kualitas Air Produksi Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Ngagel II

No.	Parameter	Satuan	Metode Uji	Standar Permenkes RI No. 492 Tahun 2010	Hasil Analisa Tahun 2014	Hasil Analisa Tahun 2015	Hasil Analisa Tahun 2016
13.	Fluorida	mg/l F	APHA 4500-F.D-2005	1,5	0,24	0,72	0,67
14.	Besi	mg/l Fe	APHA 3500-Fe-B	0,3	0,02	0,05	0,09
15.	Krom	mg/l Cr	APHA 3500-Cr-B-2005	0,05	-	0	0,01
16.	Kadmium	mg/l Cd	ICP.APHA Sesion 3125	0,003	-	0	0
17.	Mangan	mg/l Mn	ICP .APHA Sesion 3126	0,4	-	0,06	0,03
18.	Seng	mg/l Zn	ICP .APHA Sesion 3127	3	-	0,01	0,01
19.	Tembaga	mg/l Cu	IK-5.4.1-27	2	0,06	0,11	0,14
20.	Rasa	-	Organoleptik	Tidak berasa	Tidak berasa	Tidak berasa	Tidak berasa
21.	Bau	-	Organoleptik	Tidak berbau	Tidak berbau	Tidak berbau	Tidak berbau
22.	Kesadahan	mg/l CaCO ₃	SNI 06-6989.12-2004	500	197,86	219,28	187,52

Sumber : PDAM Surya Sembada (2017)

Lampiran 2

Prosedur Pengujian Sisa Klor

Alat:

- Timbangan Analitik, ketelitian 0,1 mg
- Labu Erlenmeyer 250 ml
- Pipet Ukur 5 ml
- Pipet Ukur 10 ml
- Pipet Tetes

Bahan:

- Larutan indikator amilum
- Kristal KI
- Larutan standar $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$
- Asam asetat glacial

Cara Kerja:

1. Memasukkan 100 ml sampel air ke labu erlenmeyer
2. Menambahkan 10 ml asam asetat dan 4 gram KI
3. Menambahkan 12 tetes indikator amilum
4. Menitrasi dengan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$
5. Mencatat volume titrasi larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

Lampiran 3

Hasil Analisis Regresi Jarak Distribusi, *Escherichia coli*, Nilai Kebocoran Pipa terhadap Sisa Klor

Regression Analysis: Sisa Klor versus Jarak; E Coli; Kebocoran Pipa

The regression equation is

Sisa Klor = 0,362 - 0,000039 Jarak + 0,00023 E Coli + 0,092
Kebocoran Pipa

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,36191	0,09265	3,91	0,002
Jarak	-0,00003902	0,00001192	-3,27	0,007
E Coli	0,000233	0,005242	0,04	0,965
Kebocoran Pipa	0,0921	0,8527	0,11	0,916

S = 0,0376554 R-Sq = 83,3% R-Sq(adj) = 78,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,077776	0,025925	18,28	0,000
Residual Error	11	0,015597	0,001418		
Total	14	0,093373			

Source	DF	Seq SS
Jarak	1	0,077583
E Coli	1	0,000176
Kebocoran Pipa	1	0,000017

Lampiran 4

Klasifikasi Pelanggan dan Tarif Air Minum PDAM Kota Surabaya

KLASIFIKASI PELANGGAN DAN TARIF AIR MINUM PDAM KOTA SURABAYA

Berdasarkan Peraturan Walikota No. 55 Tahun 2005 tanggal 29 Nopember 2005 tentang Tarif Air Minum dan Struktur Pemakaian Air Minum Perusahaan Daerah Air Minum Kota Surabaya, dan berdasarkan Peraturan Perusahaan, Perusahaan Daerah Air Minum Kota Surabaya No. 04 Tahun 2008 tanggal 03 Maret 2008 tentang Klasifikasi Kelompok Pelanggan Air Minum, maka dengan ini ditetapkan pengelompokan pelanggan PDAM Kota Surabaya.

KLASIFIKASI	Kode Tarif	Pemak. Air (M ³)	Tarif Air (Rp/M ³)	Pemak. Min/Bln (M ³)
1	2	3	4	5
KELOMPOK PELANGGAN I 1. Hidran umum; 2. Tempat ibadah; 3. Rumah susun sewa (Rusunawa).	1	Non Progresif	600	10
KELOMPOK PELANGGAN II 1. Pondok Pesantren, Panti Asuhan, Panti Jompo, Panti Sosial; 2. Sekolah negeri, Madrasah, Sekolah swasta (TK, SD, SLTP,SLTA) dengan akreditasi C; 3. Balai pertemuan RT dan RW; 4. Rumah susun milik (Rusunami) dengan penjualan curah; 5. Rumah tangga (RT) 1, yaitu : Kelompok pelanggan rumah tangga yang memenuhi semua kriteria sebagai berikut : a. Didepannya terdapat jalan dengan lebar termasuk saluran/got dan berm < 3meter; b. Daya listrik terpasang < 1300 VA; c. Nilai Jual Obyek Pajak (NJOP) < Rp.50juta; d. Luas bangunan < 36 m ² .	2A	0 - 10 11 - 20 21 - 30 >30	350 600 900 1.800	10
KELOMPOK PELANGGAN III 1. Layanan kesehatan milik Pemerintah (Puskesmas, Poliklinik, BKIA, Rumah Sakit) non komersial; 2. Kamar mandi umum, ponten / WC umum.	2B	0 - 10 11 - 20 >20	500 1.000 2.250	10
KELOMPOK PELANGGAN IV 1. Rumah tangga (RT) 2, yaitu : Kelompok pelanggan rumah tangga yang tidak memenuhi salah satu kriteria RT3, RT4,RT5 dan memenuhi salah satu kriteria sebagai berikut : a. Didepannya terdapat jalan dengan lebar termasuk saluran/got dan berm ≥ 3 meter akan tetapi < 5 meter; b. Daya listrik yang terpasang < 1300 VA; c. Nilai Jual Obyek Pajak (NJOP) ≥ Rp.50juta akan tetapi < Rp.150 juta; d. Luas bangunan ≥ 36 m ² akan tetapi < 120m ² .	3A	0 - 10 11 - 20 >20	500 1.200 1.900	10

1	2	3	4	5
<p>KELOMPOK PELANGGAN V</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kursus ketrampilan, Warnet/Wartel > 4 unit; 2. Salon kecantikan, usaha kesegaran jasmani, laundry; 3. Depot/Cafe, katering rumah tangga; 4. Lab. Medis, Apotik, Poliklinik swasta, BKIA swasta; 5. Rumah sakit swasta kategori kecil; 6. Losmen/Wisma/Penginapan/Guest House/Hotel non bintang; 7. Gedung pertemuan/Mess milik Pemerintah yang dikomersialkan; 8. Industri rumah tangga; 9. Kegiatan usaha/industri/profesi perorangan yang berskala Ekonomi kecil; 10. Layanan kesehatan milik Pemerintah yang dikomersialkan. 	3B	0 - 10 11 - 20 >20	1.500 3.500 6.000	10
<p>KELOMPOK PELANGGAN VI</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sekolah Swasta (TK, SD, SLTP, SLTA) dengan akreditasi A & B; 2. Pasar tradisional milik Pemerintah dan atau milik masyarakat; 3. Usaha kost lebih dari 5 kamar; 4. Perguruan Tinggi Negeri dan Swasta selain Akreditasi A; 5. Ruko/Rukan dengan lebar jalan termasuk berm \leq 9 meter; 6. Rumah tangga (RT) 5, yaitu : Kelompok pelanggan rumah tangga yang memenuhi salah satu kriteria sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> a. Di depannya terdapat jalan protocol, jalan Utama, jalan lainnya yang mempunyai Nilai ekonomis tinggi; b. Didepannya terdapat jalan dengan lebar termasuk saluran/got dan berm \geq 15 meter; c. Daya listrik yang terpasang \geq 4400 VA; d. Nilai Jual Obyek Pajak (NJOP) \geq Rp.500 juta; e. Luas bangunan \geq 300 m². 	3C	0 - 10 11 - 20 >20	2.300 4.000 5.500	10
<p>KELOMPOK PELANGGAN VII</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Rumah susun milik dengan penjualan non curah; 2. Rumah tangga(RT) 3, yaitu : Kelompok pelanggan rumah tangga yang tidak memenuhi salah satu kriteria RT4, RT5 dan memenuhi salah satu kriteria berikut: <ol style="list-style-type: none"> a. Didepannya terdapat jalan dengan lebar termasuk saluran/got dan berm \geq 5 meter akan tetapi < 6,5 meter; b. Daya listrik yang terpasang \geq 1300 VA, akan tetapi < 2200 VA; c. Nilai Jual Obyek Pajak (NJOP) \geq Rp.150 juta akan tetapi < Rp.250 juta; d. Luas bangunan \geq 120 m² akan tetapi < 200m². 	4A	0 - 10 11 - 20 >20	1.000 1.500 2.500	10
<p>KELOMPOK PELANGGAN VIII</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kantor Pemerintah/ Asing/ Parpol; 2. Apartemen milik; 3. Rumah tangga (RT) 4, yaitu : Kelompok pelanggan rumah tangga yang tidak memenuhi salah satu kriteria RT 5 dan memenuhi salah satu kriteria sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> a. Didepannya terdapat jalan dengan lebar termasuk saluran /got dan berm \geq 6,5meter akan tetapi < 15 meter; b. Daya listrik yang terpasang \geq 2200 VA, akan tetapi < 4400 VA; c. Nilai Jual Obyek Pajak (NJOP) \geq Rp.250 juta akan tetapi < Rp.500 juta; d. Luas bangunan \geq 200m² akan tetapi < 300m². 	4B	0 - 10 11 - 20 >20	1.500 2.200 3.500	10

1	2	3	4	5
<p>KELOMPOK PELANGGAN IX</p> <ol style="list-style-type: none"> Usaha Pabrikasi/ Industri besar; Semua usaha yang menggunakan air sebagai bahan Baku operasional; Usaha pendinginan, pemanasan, tenaga uap, penyamakan; Rumah Sakit kategori besar; Perguruan tinggi negeri dan swasta akreditasi A. 	4C	0 - 10 11 - 20 >20	4.000 6.000 7.500	10
<p>KELOMPOK PELANGGAN X</p> <ol style="list-style-type: none"> Gudang, Kantor; Restoran/rumah makan, Dept. Store/Swalayan, Pertokoan, Ruko/Rukan di jalan Protokol atau Lebar jalan termasuk berm > 9 meter; Lembaga Pendidikan Profesi ; Cuci/Salon Mobil Besar, Bengkel Automotive Besar; Hotel berbintang, Rental Kondominium Dan Apartemen; Kolam Renang, Fitness Centre, Tempat Hiburan; Stasiun TV, Radio, BUMN, BUMD, Bank; Apotik Besar, Lab.Medis Besar, gedung / fasilitas pemerintah yang dikomersialkan; Pasar Pemerintah yang mengikutsertakan modal swasta / swakelola; Usaha besar swasta yang terdiri atas PMDN/PMA; Usaha bersama atau besar lainnya diluar kategori usaha kecil. 	4D	0 - 10 11 - 20 >20	6.000 8.000 9.500	10
<p>KELOMPOK PELANGGAN XI</p> <ol style="list-style-type: none"> Pelabuhan Udara Pelabuhan Laut 	5	Non Progresif	10.000	10

Dikeluarkan di : Surabaya
Tanggal : 03 Maret 2008

A. n. Direksi Perusahaan Daerah Air Minum
Kota Surabaya
DIREKTUR UTAMA



(Handwritten Signature)
MOHAMAD SELIM

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Eka Dian Srikandi dan akrab disapa Eka. Penulis yang lahir di Raha tanggal 24 Juli 1992 ini merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Islam Kendari, SDN 12 Kendari, SMPN 2 Kendari, dan SMAN 1 Kendari. Setelah lulus SMA, penulis mengikuti SNMPTN dan diterima sebagai mahasiswi Program Studi Teknik Lingkungan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik angkatan 2010 Universitas Hasanuddin di Makassar. Pada Januari 2015 penulis menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Studi Identifikasi dan Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik di Kecamatan Mariso Kota Makassar”. Kemudian, pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan S2 Jurusan Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Surabaya. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. Kertas Keces (Persero). Segala bentuk komunikasi yang ingin disampaikan kepada penulis terkait tesis ini dapat disampaikan melalui email ekadiansrikandi@gmail.com.