



TESIS - RE 185401

PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI SUMBERSARI PERUMDA AIR MINUM TUGU TIRTA KOTA MALANG

GALIS ASMARA
6014201032

Pembimbing
Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

Ko-Pembimbing
Ir. Muhammad Sundoro, M.Eng.

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2021



TESIS - RE 185401

PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI SUMBERSARI PERUMDA AIR MINUM TUGU TIRTA KOTA MALANG

GALIS ASMARA
6014201032

Pembimbing
Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

Ko-Pembimbing
Ir. Muhammad Sundoro, M.Eng.

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2021



THESIS - RE 185401

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN SUMBERSARI WATER DISTRIBUTION SYSTEM PERUMDA TUGU TIRTA OF MALANG CITY

GALIS ASMARA
6014201032

Supervisor
Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

Co-Supervisor
Ir. Muhammad Sundoro, M.Eng.

Department of Environmental Engineering
Faculty of Civil, Planning, and Geo-Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2021

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

GALIS ASMARA

NRP: 6014201032

Tanggal Ujian: 21 Desember 2021

Periode Wisuda: Maret 2022

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 197306012000031001

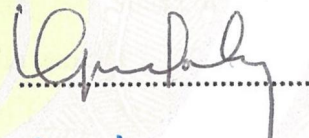


2. Ir. Muhammad Sundoro, M. Eng.
NIP: 196605121996031001

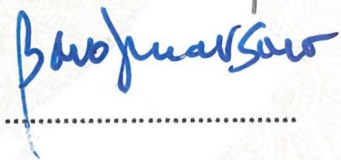


Penguji:


1. Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T.
NIP: 196801281994031003



2. Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng.
NIP: 196503171991021001



Kepala Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan


Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
NIP: 198201192005011001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur marilah kita panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat iman dan islam serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis dengan judul **“Peningkatan Efisiensi Energi pada Sistem Distribusi Sumbersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang”**. Tidak lupa shalawat serta salam juga selalu teriring kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah mengarahkan kita ke jalan kebaikan. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Sunaryo dan Ibu Suliyah selaku orang tua tercinta atas dukungan dan doa yang selalu teriring bagi penulis, serta Dwi Imansari Rahayu selaku adik perempuan;
2. Istri tersayang, Milade Annisa Muflihaini yang telah memberikan motivasi dan bantuan nyata sehingga tesis ini dapat terselesaikan, serta Bapak Andi Arqam dan Ibu Rubini yang senantiasa mendukung dan mendoakan kelancaran studi penulis;
3. Bapak Adhi Yuniarto, Ph.D dan Bapak Ir. Muhammad Sundoro, M. Eng. selaku pembimbing ITS dan pembimbing PUPR yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan koreksi dan arahan kepada penulis;
4. Bapak Dr. Ali Masduqi, M.T. dan Bapak Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng. selaku penguji atas bimbingan dan masukannya terhadap laporan tesis;
5. Bapak Ir. Anang Muchlis, Sp.PSDA selaku Direktur Air Minum, Ibu Ratria Anggraini, S.T., M.E. selaku Kasubdit Wilayah II dan Ibu Tyas Mami, M.T. selaku koordinator Banusra dan seluruh rekan-rekan di Direktorat Air Minum yang telah memberikan dukungan kepada penulis;
6. Bapak Ir. Rahardjono dan Bapak Gigih Yuli Asmara, S.T. selaku pembimbing selama penulis melaksanakan magang dan pengambilan data di Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang;

7. Mas Defki, Mba Laila dan Mba Intan serta rekan-rekan di Bagian Produksi Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang yang telah banyak membantu dan mengarahkan penulis dalam pengumpulan data tesis;
8. Bang Adrial, Bang Rizeki, Mas Fajar, Bang Rubi, Bang Julius, Mas Fajri, Anwar, Bli Made, Fikri, Mba Hanifa, Fira, Astri, Qory dan Qoyum selaku teman seperjuangan di Program Magister Super Spesialis Bidang Air Minum angkatan 2020 atas diskusi dan kebersamaannya;
9. BPSDM Kementerian PUPR yang telah memfasilitasi penulis sejak mendaftar hingga lulus di Program Magister Super-Spesialis Bidang Air Minum; dan
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa dokumen tesis ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran dari pembaca akan sangat bermanfaat demi penyempurnaannya. Terakhir penulis berharap tesis ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, 22 Desember 2021

Penulis,

Galis Asmara

PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI SUMBERSARI PERUMDA AIR MINUM TUGU TIRTA KOTA MALANG

Nama : Galis Asmara
NRP : 6014201032
Pembimbing : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Pembimbing : Ir. Muhammad Sundoro, M.Eng

ABSTRAK

Pelayanan air minum Kota Malang diselenggarakan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang menggunakan kombinasi sistem perpompaan (73%) dan sistem gravitasi (27%). Dominasi sistem perpompaan mengakibatkan biaya energi di Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang (Rp 478/m³) lebih tinggi dibandingkan rata-rata nasional (Rp 345,77/m³). Lokasi penelitian di Sistem Distribusi Sumbersari dipilih karena operasional pompa berjalan selama 24 jam mengikuti fluktuasi pemakaian sehingga penggunaan energi tidak efisien.

Penelitian ini menganalisis alternatif peningkatan efisiensi energi pada sistem perpompaan Sumbersari melalui 2 (dua) skema, yaitu penggunaan *Elevated Reservoir* dan pemasangan *Variable Speed Drive* (VSD). Metode penelitian yang dilakukan antara lain analisis total pemakaian energi eksisting, kajian teknis jaringan pipa dengan Epanet 2.0, melakukan perencanaan sistem pada kedua alternatif beserta analisis jaringan pipa dengan Epanet 2.0, identifikasi peningkatan efisiensi energi, menghitung perkiraan biaya, dan analisis kelayakan finansial.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua alternatif dapat meningkatkan efisiensi pada sistem eksisting. Pembangunan *Elevated Reservoir* berkapasitas 129 m³ menghasilkan penghematan energi listrik yang lebih besar dibandingkan VSD, yaitu sebesar 29,49% dengan nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) 0,37 kWh/m³. Sedangkan pemasangan VSD menghasilkan penghematan 10,18% dan nilai SEC 0,35 kWh/m³. Namin, berdasarkan hasil analisis teknis dan kelayakan finansial bahwa skema pemasangan VSD lebih dapat direkomendasikan dibandingkan pembangunan *Elevated Reservoir*. Pemilihan tersebut didasarkan pada terpenuhinya aspek teknis dan seluruh aspek finansial yaitu NPV sebesar Rp 699.634.016; BCR sebesar 1,64; PP kurang dari 4 tahun; dan IRR sebesar 72,18%.

Kata Kunci: efisiensi energi, *elevated reservoir*, *variable speed drive*, sistem distribusi sumbersari

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN SUMBERSARI WATER DISTRIBUTION SYSTEM PERUMDA TUGU TIRTA OF MALANG CITY

By : Galis Asmara
Student Identity Number : 6014201032
Supervisor : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.
Co-Supervisor : Ir. Muhammad Sundoro, M.Eng

ABSTRACT

Malang city's drinking water service is organized by Perumda Air Minum Tugu Tirta using a combination of pumping system (73%) and gravity system (27%). The dominance of the pumping system resulted in energy costs at Perumda Air Minum Tugu Tirta of Malang City (Rp 478 /m³) higher than the national average (Rp 345,77 /m³). Summersari Distribution System was chosen as the study location because the pump operation runs for 24 hours following customer usage fluctuations and it causes the energy usages to become inefficient.

This study analyzes alternative energy efficiency improvements in Summersari Distribution System through 2 (two) schemes. The first was through the construction of an Elevated Reservoir and the second was through the installation of a Variable Speed Drive (VSD). The methods of this study were the analysis of the total existing energy usage, technical analysis on the pipeline network with Epanet 2.0, design on both schemes along with pipeline analysis with Epanet 2.0, identification of energy efficiency improvements, calculation of cost estimates, and the analysis of financial feasibility.

The results showed that the two alternatives could increase the efficiency of the existing system. The construction of an Elevated Reservoir with a capacity of 129 m³ resulted in higher electrical energy savings compared to VSD. It had an electrical energy savings of 29.49% and Specific Energy Consumption (SEC) of about 0.37 kWh/m³. The other scheme, the installation of a VSD resulted in an electrical energy savings of 10.18% and SEC of about 0.35 kWh/m³. However, based on the results of technical analysis and financial feasibility, the VSD installation scheme was more recommended than the construction of an Elevated Reservoir. The selection was based on the fulfillment of all technical and financial aspects, with an NPV of about Rp 699.634.016, BCR of 1.64, PP less than 4 years, and IRR of 72,18%.

Key words: *sumbersari distribution system, energy efficiency, elevated reservoir, variable speed drive*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Ruang Lingkup	3
1.6. Hipotesis	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Penyediaan Air Minum.....	5
2.2 Reservoir.....	6
2.3 Sistem Perpompaan	7
2.4 Jaringan Distribusi	8
2.5 Kebutuhan Energi di SPAM	10
2.6 Pemborosan Energi.....	10
2.7 Penerapan Efisiensi Energi	11

2.8	Audit Energi	12
2.9	Strategi Peningkatan Efisiensi Energi	13
2.10	Specific Energy Consumption (SEC)	15
2.11	<i>Variable Speed Drive</i>	15
2.12	Kelayakan Finansial	16
2.13	Gambaran Umum Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang	19
2.14	Gambaran Umum Lokasi Penelitian	22
 BAB III METODE PENELITIAN.....		25
3.1	Kerangka Penelitian	25
3.2	Tahapan Penelitian	27
3.2.1	Tahapan Persiapan	27
3.2.2	Tahapan Pengumpulan Data	27
3.2.3	Tahapan Analisis dan Pengolahan Data	28
3.2.4	Tahapan Penarikan Kesimpulan dan Saran	31
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Identifikasi Kondisi Eksisting Sistem Distribusi Sumpster	33
4.1.1	Skema Distribusi Air Minum	33
4.1.2	Analisis Jaringan Pipa Eksisting	35
4.1.3	Efisiensi Energi Eksisting	41
4.2	Perencanaan <i>Elevated Reservoir</i>	42
4.2.1	Dimensi <i>Elevated Reservoir</i>	43
4.2.2	Analisis Efisiensi Energi	47
4.3	Perencanaan <i>Variable Speed Drive (VSD)</i>	48

4.3.1 Pengaruh VSD terhadap Debit, Head dan Daya.....	49
4.3.2 Pemilihan Frekuensi Kerja VSD	50
4.3.3 Analisis Efisiensi Energi.....	51
4.4 Analisis Teknis dan Kelayakan Finansial.....	52
4.4.1 Analisis Jaringan Pipa dengan <i>Elevated Reservoir</i>	52
4.4.2 Analisis Finansial Pembangunan <i>Elevated Reservoir</i>	57
4.4.3 Analisis Jaringan Pipa dengan VSD.....	62
4.4.4 Analisis Finansial Pemasangan VSD	63
4.5 Perbandingan Skema <i>Elevated Reservoir</i> dan VSD.....	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	75

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tipikal Penempatan Pompa yang Umum Diterapkan pada SPAM..	10
Gambar 2. 2 Roadmap untuk Mencapai Efisiensi Energi yang Maksimal	12
Gambar 2.3 Pengaruh Perubahan Kecepatan Putar terhadap Kinerja Pompa.....	16
Gambar 2.4 Peta Jaringan Perpipaan Sistem Distribusi Sumpersari	23
Gambar 2.5 Pompa Sistem Distribusi Sumpersari	22
Gambar 2.6 Skema Pelayanan Sistem Distribusi Sumpersari.....	23
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian Peningkatan Efisiensi Energi di Sistem Perpompaan Sumpersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang.....	26
Gambar 4.1 Elevasi Node dan Diameter Jaringan Pipa Eksisting	34
Gambar 4.2 Kurva Pompa Submersible Merk Vansan	36
Gambar 4.3 Demand Patern (Fluktuasi Pemakaian Air Pelanggan)	36
Gambar 4.4 Sistem Aliran Jaringan Pipa Eksisting	37
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Jaringan Eksisting pada Jam Minimum	38
Gambar 4.6 Grafik Frequency Plot Kecepatan Aliran pada Jam Minimum	39
Gambar 4.7 Hasil Simulasi Jaringan Eksisting pada Jam Maksimum.....	40
Gambar 4.8 Grafik Frequency Plot Kecepatan Aliran pada Jam Maksimum.....	41
Gambar 4.9 Rencana Penempatan <i>Elevated Reservoir</i>	45
Gambar 4.10 Skema Aliran Pipa Transmisi dari Pompa ke <i>Elevated Reservoir</i> ..	46
Gambar 4.11 Skematik Pelayanan Air Minum di Sistem Distribusi Sumpersari dengan Penambahan <i>Elevated Reservoir</i>	47
Gambar 4.12 Pengurangan Daya di Sistem Eksisting dengan VSD	52
Gambar 4.13 Sistem Aliran dengan Skema <i>Elevated Reservoir</i>	53
Gambar 4.14 Hasil Simulasi Jaringan dengan <i>Elevated Reservoir</i> pada Jam Minimum.....	54
Gambar 4.15 Grafik Frequency Plot Kecepatan Aliran pada Jam Minimum Skema <i>Elevated Reservoir</i>	55
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Jaringan dengan <i>Elevated Reservoir</i> pada Jam Maksimum	56

Gambar 4.17 Grafik Frequency Plot Kecepatan Aliran pada Jam Maksimum Skema <i>Elevated Reservoir</i>	57
Gambar 4.18 Pengaruh Pertumbuhan Pelanggan terhadap Jam Operasional Pompa dan <i>Energy Saving</i>	60
Gambar 4.19 Perbandingan Sistem Aliran Jaringan Pipa Eksisting dengan Pemasangan VSD	62
Gambar 4.20 Perbandingan Tekanan di Titik Pelayanan Terjauh Sistem Eksisting dan Pemasangan VSD	63
Gambar 4.21 <i>Variable Speed Drive</i> Merk Schneider 15 kWh	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kriteria Pipa Distribusi	9
Tabel 2.2 Nilai IRR pada Proyek Air Minum di Indonesia	19
Tabel 2.3 Sumber Air Baku Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang	20
Tabel 3.1 Data-Data Sekunder dan Primer dalam Penelitian.....	27
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Data Hidrolis dan Kelistrikan.....	41
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Volume Reservoir	43
Tabel 4.3 Data Motor dan Pompa di Sistem Distribusi Sumpersari	49
Tabel 4.4 Hubungan Antara Perubahan Frekuensi dengan Q, H, dan P	49
Tabel 4.5 Rencana Operasional VSD di Sistem Distribusi Sumpersari.....	51
Tabel 4.6 Perkiraan Biaya Pembangunan <i>Elevated Reservoir</i>	58
Tabel 4.7 Potensi Pemasukan dari Penambahan SR, Tarif dan Harga Pokok Produksi (HPP) Selama Umur Pakai <i>Elevated Reservoir</i>	59
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Arus Kas Masuk, Arus Kas Keluar dan Laba Bersih Pembangunan <i>Elevated Reservoir</i>	61
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan NPV, BCR, PP dan IRR Investasi Pemasangan <i>Elevated Reservoir</i>	62
Tabel 4.10 Perkiraan Biaya Pengadaan dan Pemasangan VSD.....	64
Tabel 4.11 Potensi Pemasukan dari Penambahan SR, Tarif dan Harga Pokok Produksi (HPP) Selama Umur Pakai VSD	65
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Arus Kas Masuk, Arus Kas Keluar dan Laba Bersih Pengadaan dan Pemasangan VSD.....	66
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan NPV, BCR, PP dan IRR Investasi VSD.....	67
Tabel 4.14 Perbandingan Hasil Analisis Teknis dan Finansial Pembangunan <i>Elevated Reservoir</i> dan Pemasangan VSD	67

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tantangan yang terjadi belakangan ini dalam sistem penyediaan air minum adalah memberikan pelayanan prima kepada pelanggan berdasarkan prinsip 4K, yaitu Kualitas, Kuantitas, Kontinuitas dan Keterjangkauan. Prinsip 4K tersebut harus mampu dipenuhi oleh penyelenggara air minum dalam hal ini PDAM. Implementasi dari prinsip ini mengharuskan PDAM mengupayakan berbagai cara salah satunya penggunaan sistem pemompaan. Dampak dari penggunaan sistem pemompaan akan berkontribusi besar pada beban biaya energi listrik yang dikonsumsi oleh PDAM.

Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang adalah perusahaan milik daerah yang menyelenggarakan pelayanan air minum di Kota Malang. Pelayanan air minum yang dilakukan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang menggunakan kombinasi sistem perpompaan sebesar 73% dan sistem gravitasi sebesar 27%. Dominasi sistem perpompaan ini mengakibatkan biaya energi di Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang (Rp 478/m³) menjadi lebih tinggi dibandingkan rata-rata biaya energi secara nasional (Rp 345,77/m³) (BPPSPAM, 2019). Komponen beban energi tersebut didapat dari perhitungan total konsumsi energi listrik dan Bahan Bakar Minyak (BBM) untuk operasional PDAM baik di unit air baku, unit produksi, unit distribusi dan perkantoran.

Umumnya konsumsi energi listrik terbesar berasal dari penggunaan pompa untuk distribusi air minum ke pelanggan. Konsumsi energi listrik tersebut dapat menjadi lebih besar lagi apabila operasional pompa selama 24 jam langsung melayani pelanggan dan mengikuti fluktuasi debit aliran berdasarkan pemakaian air harian. Operasional pompa ini akan mengakibatkan penggunaan energi menjadi tidak efisien, karena ketika tidak ada pemakaian air atau jam pelayanan minimum (malam hari) pompa tetap beroperasi secara normal.

Upaya yang telah dilakukan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang dalam hal efisiensi energi adalah dengan melakukan rekayasa teknis, diantaranya pembangunan reservoir-reservoir baru untuk mengantisipasi fluktuasi aliran, pemasangan *kapasitor bank* di panel induk reservoir Mojolangu untuk menghindari denda kVAr dan pemasangan *Variable Speed Drive (VSD)* di pompa menuju wilayah pelayanan Plaosan. Berbagai upaya tersebut belum dilakukan secara menyeluruh, dimana terdapat lokasi stasiun perpompaan yang operasional pompanya melayani pelanggan secara langsung mengikuti fluktuasi pemakaian, yaitu Stasiun Perpompaan Sumbersari. Sistem ini beroperasi selama 24 jam non-stop, mengikuti pemakaian puncak dan minimum tanpa pompa cadangan. Peningkatan efisiensi energi pada sistem ini sangat berpeluang untuk diterapkan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi eksisting efisiensi energi, menganalisis pemakaian energi dan total tagihan listrik kemudian menyediakan alternatif yang terbaik dalam upaya peningkatan efisiensi energi. Adapun alternatif yang dapat diterapkan dalam hal meningkatkan efisiensi energi adalah dengan membangun *Elevated Reservoir* atau memasang VSD. Pembangunan *Elevated Reservoir* akan mengurangi jam operasional pompa, yaitu pompa mengisi tangki pada jam-jam tertentu untuk dialirkan pada ke pelanggan. Adapun pemasangan VSD akan meminimalkan frekuensi kerja motor, yang semula tetap menjadi bervariasi yaitu frekuensi minimum pada jam-jam minimum dan frekuensi konstan pada jam-jam maksimum.

Berdasarkan uraian di atas maka diperlukan kajian secara teknis berkaitan dengan perbandingan konsumsi energi sistem eksisting, sistem baru dengan *Elevated Reservoir* (alternatif 1) dan pemasangan VSD (alternatif 2). Hasil kajian perbandingan ini dapat menjadi pertimbangan bagi Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang untuk merencanakan sistem perpompaan yang lebih efisiensi.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi eksisting efisiensi energi pada Sistem Perpompaan Sumbersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang?

2. Bagaimana pengaruh efisiensi energi di Sistem Perpompaan Sumbersari dengan pembangunan *Elevated Reservoir* (alternatif 1) dan pemasangan VSD (alternatif 2)?
3. Bagaimana kelayakan teknis dan finansial terhadap penerapan alternatif 1 dan alternatif 2?

1.3. Tujuan Penelitian

Dari permasalahan tersebut maka yang menjadi tujuan utama dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kondisi eksisting efisiensi energi melalui audit energi di Sistem Distribusi Sumbersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang;
2. Menganalisis efisiensi energi pada rencana pembangunan *Elevated Reservoir* (alternatif 1) dan pemasangan VSD (alternatif 2) di Sistem Distribusi Sumbersari; dan
3. Menganalisis kelayakan teknis dan finansial terhadap penerapan alternatif usaha peningkatan efisiensi energi.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Menjadi bahan masukan untuk Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang dalam peningkatan efisiensi energi di Sistem Distribusi Sumbersari; dan
2. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

1.5. Ruang Lingkup

1. Konsumsi energi yang dikaji dalam penelitian ini adalah total energi listrik dari pemakaian pada sistem perpompaan Sumbersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang;
2. Audit energi mengacu pada prosedur yang diterbitkan oleh IUWASH dan Kementerian PUPR;
3. Audit energi dilakukan pada pompa Sumbersari sampai menemukan angka *Specific Energy Consumption* (SEC); dan

4. Analisis jaringan perpipaan menggunakan perangkat lunak Epanet 2.0.

1.6. Hipotesis

Operasional pompa selama 24 jam langsung ke pelanggan pada Sistem Distribusi Sumbersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang mengakibatkan sistem ini mengkonsumsi energi berlebih atau tidak efisien. Hal ini dikarenakan pompa beroperasi terus menerus baik pada jam puncak maupun jam minimum. Peluang penghematan energi untuk mendapatkan sistem yang lebih efisien sangat terbuka untuk diterapkan. Skema pembuatan *Elevated Reservoir* (alternatif 1) dan pemasangan *Variable Speed Drive* (VSD) (alternatif 2) dapat mengurangi beban energi pada saat operasional pompa. Alternatif 1 akan mengurangi jam operasional pompa karena terdapat waktu-waktu tertentu yang digunakan untuk mengisi reservoir. Sedangkan alternatif 2 akan mengurangi frekuensi kerja motor, dimana VSD akan bekerja pada frekuensi minimum pada saat jam minimum. Diantara kedua alternatif tersebut harus dibandingkan berapa besaran konsumsi energi dan peningkatan efisiensi dari sistem eksisting, sehingga didapatkan skema yang paling baik untuk diterapkan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Sistem Penyediaan Air Minum

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 122 Tahun 2015 Tentang SPAM, Sistem penyediaan air minum adalah serangkaian kegiatan yang diselenggarakan untuk memberikan pelayanan air minum kepada masyarakat. Sistem penyediaan air minum harus diselenggarakan dengan menjamin kuantitas, kualitas dan kontinuitas aliran.

Penyelenggaraan SPAM merupakan tanggung jawab dari Pemerintah Pusat dan/atau Pemerintah Daerah sesuai kewenangannya. Dalam hal operasionalnya, Pemerintah Pusat dan/atau Pemerintah Daerah dapat membentuk BUMN dan/atau BUMD untuk mengelola sarana dan prasarana SPAM. Sarana dan prasarana tersebut terbagi menjadi 4 (empat) unit, yaitu unit air baku, unit produksi, unit distribusi dan unit pelayanan.

1. Unit air baku merupakan sarana pengambilan air baku yang terdiri atas bangunan penampung air, bangunan pengambilan / penyadapan, alat pengukuran dan peralatan pemantauan, sistem pemompaan dan bangunan sarana pembawa serta pelengkapannya;
2. Unit produksi merupakan infrastruktur yang dapat digunakan untuk proses pengolahan air baku menjadi air minum melalui proses fisika, kimia dan/atau biologi yang terdiri atas bangunan pengolahan dan pelengkapannya, perangkat operasional, alat pengukuran dan peralatan pemantauan, dan bangunan penampungan air minum serta dilengkapi dengan sarana pengolahan lumpur sisa hasil pengolahan air baku menjadi air minum;
3. Unit distribusi merupakan sarana pengaliran air minum dari bangunan penampungan sampai ke unit pelayanan yang terdiri atas jaringan distribusi dan perlengkapannya, bangunan penampungan dan alat pengukuran dan peralatan pemantauan. Unit distribusi dapat dialirkan dengan sistem pemompaan dan/atau secara gravitasi.

4. Unit pelayanan merupakan titik pengambilan air yang terdiri atas sambungan langsung, hidran umum dan/atau hidran kebakaran. Unit pelayanan ini harus dipasang alat pengukuran berupa meter air.

Saat ini penyelenggaraan SPAM di Indonesia mengalami berbagai permasalahan. Menurut Kementerian PUPR (2020) permasalahan yang umum terjadi di infrastruktur SPAM adalah:

1. Kapasitas handal air baku menurun;
2. Kualitas air baku menurun akibat adanya pencemaran sumber dari sampah, intrusi air laut dan perubahan tata guna lahan di hulu;
3. Terjadi konflik pemakaian air baku;
4. Penyelenggara SPAM di tingkat daerah umumnya belum memiliki perencanaan kebutuhan air baku; dan
5. Terjadinya bencana kekeringan melanda di berbagai daerah.

Selain uraian permasalahan di atas, bahwa kinerja operator SPAM perlu ditingkatkan. PDAM selaku pengelola di tingkat Kabupaten/Kota belum dapat melaksanakan pelayanan dengan prima. Dari 380 PDAM yang dinilai kinerjanya, sebanyak 224 BUMD Penyelenggara SPAM Sehat (58,95%), 102 BUMD Penyelenggara SPAM Kurang Sehat (26,84%) dan 54 BUMD Penyelenggara SPAM Sakit (14,21%) (BPPSPAM, 2019).

2.2 Reservoir

Reservoir adalah sebuah bangunan penampung air yang digunakan untuk menjaga kesetimbangan antara produksi dengan kebutuhan, sebagai penyimpan kebutuhan air dalam kondisi darurat dan sebagai penyedia kebutuhan air untuk keperluan instalasi (Peraturan Menteri PUPR Nomo 27 Tahun 2016). Reservoir sangat berperan dalam sistem pengaliran dimana ketika jam minimum atau tidak ada pemakaian, air yang diproduksi akan tertampung pada reservoir untuk dialirkan pada saat jam puncak (Taini dan Purnomo, 2017).

Penempatan reservoir terbagi menjadi 3 yaitu a) di bawah permukaan tanah, b) sebagian atau seluruhnya di atas permukaan tanah; dan c) di atas tanah dengan penyangga. Fungsi dari reservoir dalam sistem distribusi terbagi menjadi 2 kategori (SNI 7509-2011):

1. Fungsi pelayanan
 - a. Pemasok sebagian besar jaringan pipa distribusi;
 - b. Penambah tekanan air pada jaringan pipa distribusi;
 - c. Menbuat tekanan air relatif stabil;
 - d. Penampung persediaan air dalam keadaan darurat;
 - e. Tempat pencampuran air dengan desinfektan; dan
 - f. Tempat pengendapan pasir atau kotoran yang mungkin masih terbawa dari instalasi pengolahan atau sumber.
2. Fungsi penyeimbang
 - a. Penampung air bersih yang dipompakan dan didistribusikan ke daerah pelayanan; dan
 - b. Penghematan pemakaian tenaga listrik jika menggunakan pompa.

2.3 Sistem Perpompaan

Pompa adalah alat atau mesin yang digunakan untuk memindahkan atau menaikkan fluida cairan dari suatu tempat rendah ke tempat yang lebih tinggi melalui sistem perpipaan. Penggunaan pompa bertujuan untuk mengubah energi listrik menjadi energi fluida (Stoffel, 2015). Adapun penggunaan pompa dalam sistem penyediaan air minum dipakai ketika terdapat kebutuhan tekanan yang tidak dapat dipenuhi dengan gaya gravitasi. Pompa akan memberikan tekanan tertentu pada air sehingga dapat mencapai titik pelayanan. Dalam hal operasional, apabila sebuah pompa tidak dapat memenuhi kapasitas dan tekanan yang diinginkan maka dapat dipasang pompa secara paralel

Pompa yang sering digunakan untuk air minum adalah jenis pompa sentrifugal. Jenis pompa ini memiliki impeller yang berputar untuk menaikkan momentum fluidanya. Putaran impeller yang terjadi pada *casing* akan membuat fluida air ikut berputar membentuk gaya sentrifugal kemudian menghasilkan tekanan (*head*) sesuai perencanaan. Pemilihan pompa untuk penyediaan air minum harus mempertimbangkan beberapa hal, diantaranya (SNI-7509, 2011):

1. Kapasitas dan total *head* pompa yang mampu beroperasi pada titik optimum dan memiliki efisiensi yang tinggi;
2. Pemilihan tipe pompa sesuai kebutuhan;

- a. Tipe sumbu vertikal jika tidak ada risiko terendam air;
 - b. Tipe *mixed flow* dan *axial flow* jika total *head* kurang dari 6 m dan ukuran pompa lebih dari 200 mm; dan
 - c. Tipe sentrifugal jika total *head* yang dibutuhkan lebih dari 20 m dan ukuran pompa lebih kecil dari 200 mm.
3. Kombinasi pemasangan pompa hendaknya memperhatikan syarat titik optimum kinerja pompa, yaitu titik potong antara kurva pompa dan kurva sistem;
 4. Sebuah sistem harus memiliki pompa cadangan untuk mengantisipasi saat perawatan dan perbaikan pompa.

2.4 Jaringan Distribusi

Menurut SNI 7509: 2011 tentang Tata Cara Perencanaan Teknik Jaringan Distribusi dan Unit Pelayanan Sistem Penyediaan Air Minum, jaringan pipa distribusi terdiri dari beberapa komponen yaitu jaringan distribusi utama (zona distribusi), sel utama dan sel dasar.

Perencanaan jaringan pipa harus menggunakan analisis hidrolis berupa penentuan debit dan kehilangan energi di setiap pipa (Qasim dkk., 2000). Kehilangan energi terbagi menjadi dua macam yaitu *head loss mayor* karena gesekan fluida pada dinding pipa dan *head loss minor* karena sambungan dan aksesoris pipa (Waspo, 2017). Ketentuan yang harus dipenuhi dalam perancangan sistem distribusi menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat nomor 27 tahun 2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan denah sistem distribusi ditentukan berdasarkan topografi wilayah pelayanan dan lokasi instalasi pengolahan air;
2. Tipe sistem distribusi ditentukan berdasarkan keadaan topografi wilayah pelayanan, dalam hal ini adalah gravitasi atau dengan pompa;
3. Jika keadaan topografi tidak memungkinkan menggunakan sistem gravitasi seluruhnya, maka dapat diusulkan kombinasi antara sistem gravitasi dan pompa. Jika semua wilayah pelayanan relatif datar dengan elevasi yang hampir sama, dapat digunakan sistem perpompaan langsung, kombinasi dengan menara air, atau penambahan pompa penguat (*booster pump*);

4. Jika terdapat perbedaan elevasi wilayah pelayanan yang ekstrim atau terlalu besar (lebih dari 40 meter), wilayah pelayanan dapat dibagi menjadi beberapa zona untuk memenuhi persyaratan tekanan minimum. Dalam hal mengatasi tekanan yang berlebihan dapat digunakan katup pelepas tekan (*pressure reducing valve*) dan untuk mengatasi kekurangan tekanan dapat digunakan pompa penguat;
5. Perencanaan pipa distribusi mengikuti kriteria pipa distribusi sebagai berikut:

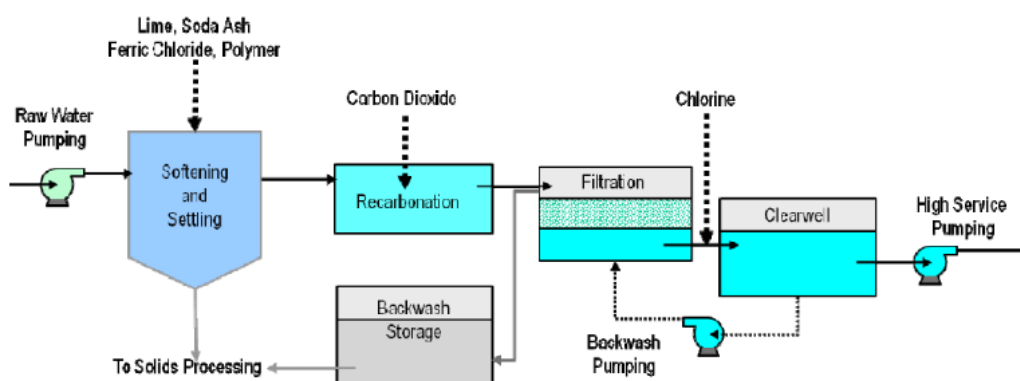
Tabel 2.1 Kriteria Pipa Distribusi

No	Uraian	Notasi	Kriteria
1	Debit perencanaan	Q puncak	Kebutuhan air jam puncak Q peak = faktor jam puncak x Q rata-rata
2	Faktor jam puncak	F puncak	1,15 – 3
3	Kecepatan aliran air dalam pipa - Kecepatan min. - Kecepatan maks. Pipa PVC atau ACP Pipa baja atau DCIP	V min V max	0,3 – 0,6 meter/detik 2,0 – 4,5 meter/detik 6 meter/detik
4	Tekanan air dalam pipa - Tekanan min. - Tekanan maks. Pipa PVC atau ACP Pipa baja atau DCIP Pipa PE 100 Pipa PE 80	H min H max	0.5-1,0 atm 6-8 atm 10 atm 12,4 Mpa 9 Mpa

Sumber: Peraturan Menteri PUPR Nomor 27 tahun 2016

2.5 Kebutuhan Energi di SPAM

Pada umumnya porsi penggunaan energi listrik untuk menggerakkan motor pompa bisa mencapai 50-80% dari seluruh energi listrik yang digunakan PDAM (Kementerian PUPR, 2014). Penggunaan pompa bervariasi tergantung pada karakteristik tertentu seperti topografi, iklim, suhu musiman, dan curah hujan. Sebagian besar energi yang digunakan untuk keperluan yang berhubungan dengan air adalah dalam bentuk listrik (Copeland & Carter, 2017). Sumber energi yang umum digunakan berasal dari energi listrik PLN, walaupun sebagian PDAM juga memiliki *genset* sebagai cadangan.



Gambar 2.1 Tipikal Penempatan Pompa yang Umum Diterapkan pada SPAM (Kementerian PUPR, 2014)

2.6 Pemborosan Energi

Pada infrastruktur SPAM sering ditemukan kasus pemborosan energi listrik, terutama yang berkaitan dengan penggunaan pompa. Beberapa hal yang menyebabkan pemborosan energi di PDAM, diantaranya:

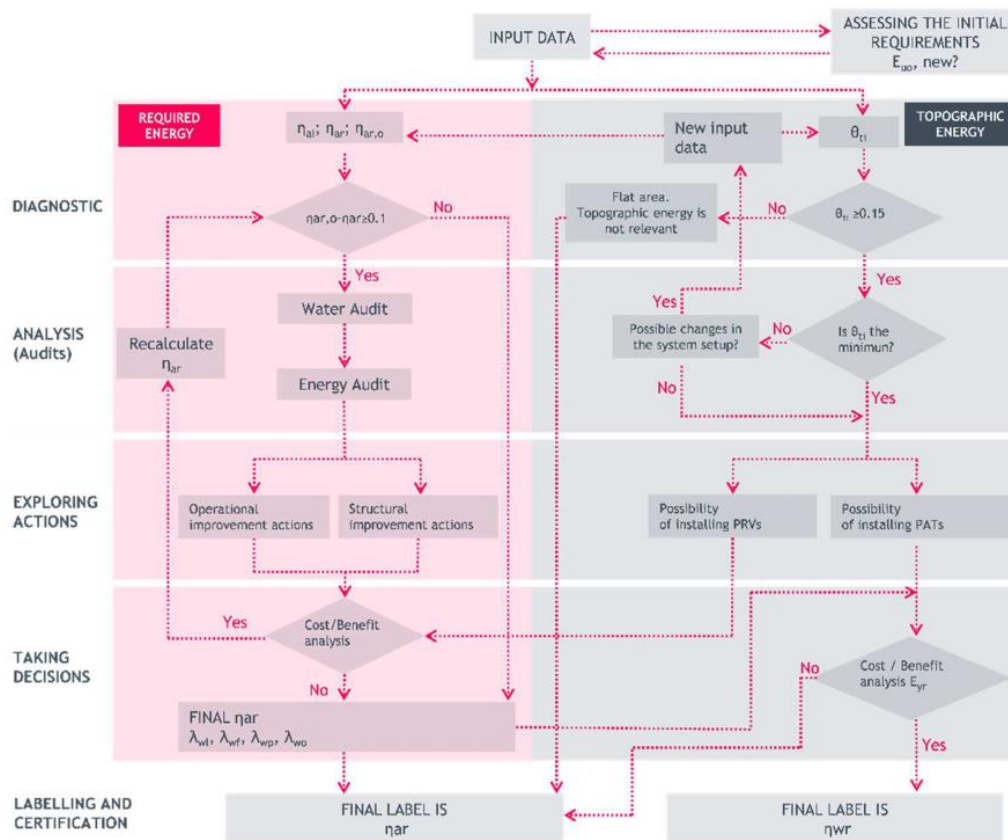
1. Studi yang dilakukan di stasiun pompa distribusi Cilincing, pemborosan energi disebabkan karena ketidaksesuaian antara spesifikasi pompa dengan kurva karakteristik beban (Muji dkk., 2018);
2. Ketidaksesuaian spesifikasi pompa yang telah dipasang karena peningkatan head dinamis di jaringan pipa. Peningkatan head dinamis ini dipengaruhi oleh endapan kapur dan bahan kimia yang menambah nilai kekasaran dan pengurangan luas penampang pipa (Suparno, 2013);

3. Penurunan nilai efisiensi kerja pompa disebabkan oleh faktor kualitas material pompa, perawatan selama operasi dan pemasangan instalasi (Saksono, 2011); dan
4. *Overdesign* karena konfigurasi pompa yang menggunakan *safety-factor* yang tinggi sehingga motor bekerja di bawah titik optimalnya (Kementerian PUPR, 2014).

2.7 Penerapan Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah bagian penting untuk meningkatkan nilai ekonomi suatu sistem dengan cara mengurangi penggunaan energi. Pengurangan penggunaan energi dapat dilakukan dengan merubah cara operasional dan pemeliharaan, investasi pada teknologi yang lebih efisien, pengaturan waktu operasi, dan melakukan konversi energi (Thollander dkk., 2020). Selain itu juga, efisiensi energi dapat dicapai dengan perubahan konfigurasi atau modifikasi pada jaringan distribusi (Hashemi dkk., 2015). Pada operasional pompa, sangat baik untuk melakukan penjadwalan operasi untuk peningkatan efisiensi energi (Syahputra dkk., 2018). Penjadwalan tersebut hendaknya dikaji menyeluruh dengan analisis yang mencakup kajian topografi (Cabrera dkk., 2015).

Efisiensi energi ini dapat dicapai dengan mengkaji *Unavoidable Minimum Energy (UME)* yang digunakan sebagai acuan minimum dalam memastikan pelayanan air minum yang efisien (Bolognesi dkk., 2014). Setidaknya ada 6 (enam) langkah yang dapat dilakukan dalam pengurangan energi, yaitu penilaian awal penggunaan energi, diagnosis sistem, analisis sistem, eksplorasi potensi tindakan, menyusun prioritas dengan analisis biaya-manfaat dan melakukan sertifikasi (Enrique Cabrera dkk., 2017).



Gambar 2. 2 Roadmap untuk Mencapai Efisiensi Energi yang Maksimal (Enrique Cabrera, 2016)

2.8 Audit Energi

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 70 Tahun 2009 tentang Konservasi Energi, audit energi didefinisikan sebagai proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna energi dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energi. Pelaksanaan audit energi di PDAM akan menjadi acuan untuk mencapai penggunaan energi yang lebih efisien. Terdapat 3 (tiga) tahap dalam pelaksanaan audit energi, yaitu (Kementerian PUPR, 2014):

1. *Pre-Audit activities*, mencakup kegiatan perencanaan pelaksanaan, pengumpulan data dan *review* kegiatan sebelum dimulainya proses audit;
2. *On-site Audit Activities*, mencakup kegiatan survey lapangan, berdiskusi dengan personil operator, evaluasi operasional SPAM, dan kegiatan penunjang lainnya; dan

3. *Post-Audit Activities*, mencakup kegiatan penelitian terhadap hasil temuan di lapangan, perhitungan data, analisis biaya dan manfaat, menyusun strategi penurunan energi dan tahap penyusunan laporan.

2.9 Strategi Peningkatan Efisiensi Energi

Setelah pelaksanaan audit energi maka hasilnya dapat menjadi acuan dalam menyusun rekomendasi strategi untuk meningkatkan efisiensi energi di PDAM. Strategi yang dapat dilakukan dalam hal peningkatan efisiensi energi adalah perbaikan pompa, pemasangan VSD, dan melakukan pemeliharaan rutin (Stoffel, 2015). Beberapa cara untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi yang dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya antara lain:

1. Perubahan desain sistem distribusi dengan menghilangkan bak pelepas tekan dan memodifikasi jaringan pipa sebelum masuk ke stasiun pompa di Adsubia (Spanyol), telah berkontribusi pada penurunan penggunaan energi sebesar 56% (Enrique Cabrera, 2016);
2. Penerapan *Demand Side Management* (DSM) menggunakan strategi *peak clipping* pada instalasi pengolahan air di PDAM Mulai Baru, Kabupaten Ketapang telah berkontribusi pada penurunan beban listrik sebesar 0,47% (Mulyono, 2020);
3. Pemasangan *Harmonic Oscillator Tank (HOT)* pada sistem distribusi air minum pada jaringan dengan kehilangan air tinggi, didapatkan efisiensi pompa sebesar 86,45% dibandingkan dengan hanya 69,84% pada penggunaan *Variable Speed Pump (VSD)* (Latchoomun dkk., 2020);
4. Penerapan Skema *Pump as a Turbines* (PATs) dengan mengganti *Pressure Reducing Valve* (PRV) menjadi *Soft Pressure Regulating System (SPRS)* diprediksi dapat meningkatkan tekanan, daya dan kurva efisiensi sebesar 3,7%, 12,2%, dan 34,4% (Tahani dkk., 2020);
5. Adanya potensi penambahan pendapatan pada pengelola air minum dengan merubah PRV menjadi skema PATs di Kota Naples (Fontana dkk., 2012);

6. Perubahan PRV dengan PATs di jaringan distribusi air minum di wilayah Apulia (Italy Selatan) akan menghasilkan tambahan produksi energi sebesar 818,028 kWh/tahun dan tambahan pendapatan sebesar 127,612 euro (Stefanizzi dkk., 2020); dan
7. Perencanaan pompa air dengan memanfaatkan tenaga surya yang dilengkapi dengan inverter dan perangkat otomasi berupa *Water Level Control* (Yuhendri dkk., 2020):

Rekomendasi program penghematan secara garis besar dikelompokkan menjadi 3 (tiga) yaitu (Kementerian PUPR, 2014) :

1. Penghematan energi dengan tanpa biaya / biaya rendah, contoh kegiatannya:
 1. Mengendalikan jam operasi puncak untuk mengurangi pemakaian energi saat Waktu Beban Puncak (WBP);
 2. Memperbaiki keseimbangan *impeller*;
 3. Memasang pompa secara paralel untuk memenuhi permintaan debit air yang beragam; dan
 4. Melakukan pemeliharaan rutin, seperti memeriksa kebocoran pipa, membersihkan *impeller*, memeriksa koneksi antar kabel pada panel kontrol, memasang manometer di pipa *suction* dan *discharge*, memeriksa tagihan PLN secara berkala.
2. Penghematan energi dengan tanpa biaya menengah, contoh kegiatannya:
 - a. Memasang kapasitor bank individual langsung pada pompa untuk perbaikan power faktor pada motor pompa itu sendiri;
 - b. Memperbaiki atau mengganti panel starter motor pompa, jika sudah tidak memenuhi persyaratan (timbul panas berlebih);
 - c. Mengganti kabel-kabel yang sudah rusak untuk mengurangi kehilangan energi; dan
 - d. Mengurangi atau meniadakan kebocoran air di sistem pompa dan sistem distribusi.
3. Penghematan energi dengan tanpa biaya tinggi
 - a. Mengganti pompa dan motor listrik penggeraknya dengan efisiensi yang lebih tinggi;

- b. Memasang *inverter* / *VSD* terutama pada pompa distribusi yang beroperasi secara paralel dan memiliki fluktuasi beban puncak yang tinggi; dan
- c. Memasang bank kapasitor secara sentral di lokasi panel induk yang dapat bekerja secara otomatis dalam mempertahankan *power factor* keseluruhan atas besaran $\cos \phi_n \geq 0,85$, untuk menghindari biaya denda.

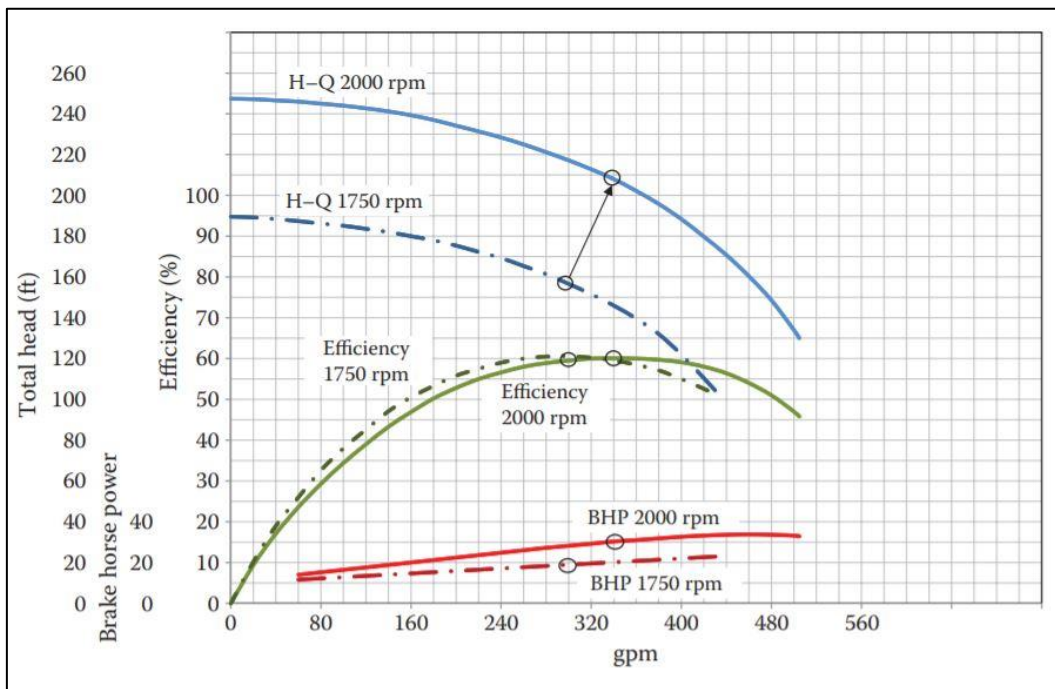
2.10 Specific Energy Consumption (SEC)

Specific Energy Consumption (SEC) adalah *benchmark* atau acuan yang akan digunakan untuk menilai tingkat efisiensi energi pada Sistem Distribusi Sumbersari dimana semakin kecil nilai SEC maka pemakaian energi dianggap semakin efisien (Kementerian PUPR, 2014). Sebuah sistem dapat dikatakan efisien apabila nilai SEC berada di bawah $0,4 \text{ kWh/m}^3$ (Balai Teknik Air Minum, 2019). Nilai SEC dapat berbeda-beda sesuai dengan kondisi pompa, nilai SEC sebesar $0,486 \text{ kWh/m}^3$ di IPA Pengok Yogyakarta (Syahputra dkk., 2018), nilai $0,17\text{-}0,96 \text{ kWh/m}^3$ di Benidorm, Spain (Yoon dkk., 2018) dan SEC sebesar $0,29 \text{ kWh/m}^3$ pada sistem distribusi air minum di China (Smith dkk., 2016).

2.11 Variable Speed Drive

Variable Speed Drive (VSD) adalah salah satu cara untuk menghemat hemat energi, ketika pompa memiliki VSD, kecepatan rotasinya dapat dikendalikan dengan pemrograman sehingga menghasilkan debit dan tekanan yang bervariasi (Sunela, 2017). Prinsip kerja VSD adalah mengubah *input* motor (listrik AC) menjadi DC dan kemudian menjadi AC lagi dengan *output* frekuensi yang dikehendaki (Anindita dkk., 2016).

VSD dapat menurunkan biaya operasional pompa dalam sebuah sistem air minum sebesar 5% dibandingkan *Fix Speed Drive* (FSD) (Moreira & Ramos, 2013). Penggantian pompa yang sesuai dengan spesifikasi dan pemasangan *Variable Speed Pump* (VSD) akan memberikan peluang penghematan energi listrik bruto lebih dari 35% per tahun (Suparno, 2013). Ketika terjadi perubahan, dalam hal ini adalah kecepatan maka performa pompa akan berubah mengikuti hukum afinitas (Volk, 2013).



Gambar 2.3 Pengaruh Perubahan Kecepatan Putar terhadap Kinerja Pompa (Volk, 2013)

2.12 Kelayakan Finansial

Penerapan strategi peningkatan efisiensi energi hendaknya memperhatikan aspek kelayakan teknis dan kelayakan finansial PDAM. Aspek kelayakan teknis berkaitan analisis kinerja pompa dan motor, analisis kinerja sistem distribusi, perbaikan faktor daya, perbaikan efisiensi pompa dan perbaikan efisiensi motor (Kementerian PUPR, 2014). Pengkajian kelayakan aspek finansial dilakukan untuk mengetahui apakah strategi peningkatan efisiensi energi layak dilaksanakan dilihat dari perspektif keuangan, dalam arti terdapat pendanaan yang cukup dan dapat membayar kembali seluruh pinjaman beserta bunganya apabila menggunakan dana pinjaman. Analisis aspek finansial dapat dilakukan dengan analisis biaya-manfaat dan analisis investasi. Perhitungannya dapat dilakukan dengan perhitungan *Benefit Cost Ratio (BCR)*, *Payback Period (PP)*, *Net Present Value (NPV)* dan *Internal Rate of Return (IRR)* dengan kriteria kelayakan sebagai berikut (Kementerian PUPR, 2020):

1. *Benefit Cost Ratio (BCR)*, rasio yang mengukur manfaat (*benefit*) bila dibandingkan dengan pengorbanan biaya (*cost*) dari sebuah proyek. Rasio ini dihitung dengan persamaan berikut:

$$BCR = \frac{PV_P}{PV_O}$$

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

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

Keterangan:

BCR = *Benefit Cost Ratio*

PV_P = Nilai sekarang dari manfaat (*Proceeds*)

PV_O = Nilai sekarang dari biaya (*Outlays*)

B = Total manfaat (*Benefit*)

C = Total biaya (*Cost*)

t = Jumlah periode pembukuan sesuai umur ekonomi

Dimana kriteria kelayakan investasi dinilai:

Jika $BCR > 1$, maka layak

Jika $BCR \leq 1$, maka tidak layak

2. *Payback Period (PP)*, metode yang digunakan untuk mengukur jangka waktu pengembalian investasi. Perhitungan PP dilakukan dengan persamaan berikut:

$$PP = \frac{\sum I}{\bar{\pi}}$$

Keterangan:

PP = jangka waktu pengembalian

$\sum I$ = total investasi proyek

$\bar{\pi}$ = aliran kas bersih (net cashflow) atau laba rata-rata pertahun

Dimana kriteria kelayakan investasi:

Jika $PP < \text{umur ekonomis proyek}$, maka layak.

Jika $PP \geq \text{umur ekonomis proyek}$, maka tidak layak

3. *Net Present Value (NPV)*, adalah indikator yang memperhatikan *time value of money*, maka *proceeds* yang digunakan adalah cashflow yang didiskontokan atas dasar biaya modal atau *rate of return* yang diinginkan. Rumus yang digunakan:

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

Keterangan:

$(C)t$ = Aliran kas masuk tahun ke t

$(Co)t$ = Aliran kas keluar tahun ke t

n = Umur ekonomis proyek

i = Suku bunga yang digunakan

t = waktu

Dimana kriteria kelayakan investasi:

Jika $NPV > 0$ maka layak

Jika $NPV < 0$ maka tidak layak layak

4. *Internal Rate of Return (IRR)*, adalah arus pengembalian yang menghasilkan NPV aliran kas masuk dan NPV aliran kas keluar. Rumus yang digunakan:

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

Keterangan:

r_1 = *Internal Rate* untuk penetapan ke-1

r_2 = *Internal Rate* untuk penetapan ke-2

NPV_1 = *Net Present Value* dari IRR_1

NPV_2 = *Net Present Value* dari IRR_2

Dimana kriteria kelayakan investasi dinilai:

Jika $IRR >$ arus pengembalian yang diinginkan maka proyek layak

Jika $IRR <$ arus pengembalian yang diinginkan maka proyek tidak layak

Dalam hal menentukan arus pengembalian proyek, digunakan nilai sebesar 11,75%. Nilai tersebut diambil dari rata-rata nilai IRR pada proyek-proyek air minum di Indonesia seperti pada Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2.2 Nilai IRR pada Proyek Air Minum di Indonesia

No	Pekerjaan	IRR	Sumber
1	SPAM Regional Umbulan	10,9%	Dokumen Studi Kelayakan SPAM Regional Umbulan (2016)
2	SPAM Regional Polman Majene	15%	Laporan Interim Studi Kelayakan SPAM Regional Polman Majene (2019)
3	SPAM Regional Mojolamong	10%	Dokumen Studi Kelayakan SPAM Regional Mojolamong (2014)
4	SPAM Regional Jatigede	10%	Dokumen Studi Kelayakan SPAM Regional Jatigede (2013)
5	SPAM Regional Sorong	10%	Dokumen Studi Kelayakan SPAM Regional Sorong (2014)
6	SPAM Regional Pasigala	14,6%	Dokumen Studi Kelayakan SPAM Regional Pasigala (2013)

2.13 Gambaran Umum Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang

Sistem penyediaan air bersih di Kota Malang sudah dimulai sejak tanggal 31 Maret 1915 oleh Pemerintahan Hindia Belanda yang saat itu dikenal dengan nama “*Waterleiding Verordening Kota Besar Malang*”. Pada saat itu pemerintah Hindia Belanda memanfaatkan sumber air Karanganyar yang saat ini secara geografis berada di wilayah Kabupaten Malang untuk ditransmisikan ke reservoir Dinoyo dan Betek. Kebutuhan air bersih yang terus mengalami peningkatan membuat pemerintah daerah pada tahun 1935 menambah kapasitas pelayanan sebesar 215

liter/detik. Penambahan kapasitas tersebut berasal dari sumber air Binangun yang saat ini berada di wilayah Kabupaten Batu.

Pada tanggal 18 Desember 1974 dengan diterbitkannya Peraturan Daerah Nomor : 11 Tahun 1974, Unit Air Minum berubah dengan status Perusahaan Daerah Air Minum. Sejak saat itu Perusahaan Daerah Air Minum Kotamadya Malang mempunyai status Badan Hukum dan mempunyai hak otonomi dalam pengelolaan air minum. Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang pada tahun 2019 memiliki total sebanyak 168.261 sambungan rumah dengan panjang pipa 3.811 km. Kapasitas total produksi yang distribusikan ke pelanggan adalah sebesar 1.718 liter/detik dengan aliran 24 jam. Saat ini Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang memiliki angka kehilangan air sebesar 15,93% dimana area pelayanannya telah terbagi menjadi *District Meter Area* (DMA) sebanyak 249 area.

Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang mengelola seluruh sarana dan prasarana air minum, yang terdiri dari unit air baku, unit produksi, unit distribusi dan unit pelayanan. Unit air baku merupakan sarana pengambilan air baku yang terdiri atas bangunan penampung air, bangunan pengambilan / penyadapan, alat pengukuran dan peralatan pemantauan, sistem pemompaan dan bangunan sarana pembawa serta pelengkapannya. Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang memanfaatkan mata air dan sumur bor sebagai sumber yang didistribusikan ke pelanggan dengan sistem kombinasi gravitasi dan pompa sesuai dengan Tabel 2.3 berikut :

Tabel 2.3 Sumber Air Baku Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang

No	Nama Sumber	Elevasi (mdpl)	Lokasi	Sistem Pengaliran	Volume Produksi (liter/detik)
1	Binangun Lama	839	Kota Batu	Gravitasi	95,60
2	Bangunan Baru	839	Kota Batu	Gravitasi	151,80
3	Karangan	721	Kota Batu	Gravitasi	29,62
4	Sumber Sari	759	Kab. Malang	Gravitasi	20,72
5	Wendit 1	430	Kab. Malang	Pompanisasi	314,94
6	Wendit 2	428	Kab. Malang	Pompanisasi	308,13
7	Wendit 3	427	Kab. Malang	Pompanisasi	351,04

No	Nama Sumber	Elevasi (mdpl)	Lokasi	Sistem Pengaliran	Volume Produksi (liter/detik)
8	Banyuning	938	Kab. Malang	Pompanisasi	20,06
9	Badut 1	497	Kota Malang	Pompanisasi	16,25
10	Badut 2	452	Kota Malang	Pompanisasi	14,22
11	Sumber Sari 1	484	Kota Malang	Pompanisasi	6,26
12	Istana Dieng 1	532	Kota Malang	Pompanisasi	17,19
13	Istana Dieng 2	503	Kota Malang	Pompanisasi	18,43
14	Supit Uring 1	532	Kota Malang	Pompanisasi	16,75
15	Supit Uring 2	503	Kota Malang	Pompanisasi	20,02
16	Mulyorejo	486	Kota Malang	Pompanisasi	14,71
17	Tlogomas 1	525	Kota Malang	Pompanisasi	20,56
18	Tlogomas 2	525	Kota Malang	Pompanisasi	29,05
19	Sumber Pitu	815	Kab. Malang	Gravitasi	137,88
Jumlah					1603,25

Sumber : Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang (Januari 2021)

Unit produksi merupakan infrastruktur yang dapat digunakan untuk proses pengolahan air baku menjadi air minum melalui proses fisika, kimia dan/atau biologi yang terdiri atas bangunan pengolahan dan pelengkapannya, perangkat operasional, alat pengukuran dan peralatan pemantauan, dan bangunan penampungan air minum serta dilengkapi dengan sarana pengolahan lumpur sisa hasil pengolahan air baku menjadi air minum. Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang tidak memiliki Instalasi Pengolahan Air (IPA) karena sumber air yang digunakan berupa sumur bor dan mata air memiliki kualitas yang cukup baik. Unit Produksi di Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang berupa penambahan klor untuk membunuh bakteri sebelum air didistribusikan ke pelanggan.

Unit distribusi merupakan sarana pengaliran air minum dari bangunan penampungan sampai ke unit pelayanan yang terdiri atas jaringan distribusi dan pelengkapannya, bangunan penampungan dan alat pengukuran dan peralatan pemantauan. Unit distribusi di Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang dialirkan dengan sistem pemompaan dan/atau secara gravitasi melalui pipa dengan

bahan bervariasi, yaitu pipa *Galvanized Iron Pipe* (GIP), pipa *High density polyethylene* (HDPE) dan sebagian masih menggunakan pipa *Asbestos Cement Pipe* (ACP). Unit pelayanan merupakan titik pengambilan air yang terdiri atas sambungan (SR) langsung, hidran umum dan/atau hidran kebakaran. SR yang dimiliki Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang dilengkapi dengan meter air. Sebagian meter sudah menggunakan tipe vertikal untuk mempermudah petugas dalam pencatatan meter.

2.14 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Skema pelayanan air minum di Sistem Distribusi Sumpster menggunakan sistem pengaliran dengan perpompaan dengan jenis *submersible*. Pompa yang digunakan berjumlah 1 buah dengan kapasitas pada label pompa debit 10 liter/detik, tekanan 40 meter dan daya (P) 11 kWh. Adapun pompa terpasang di lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.4.



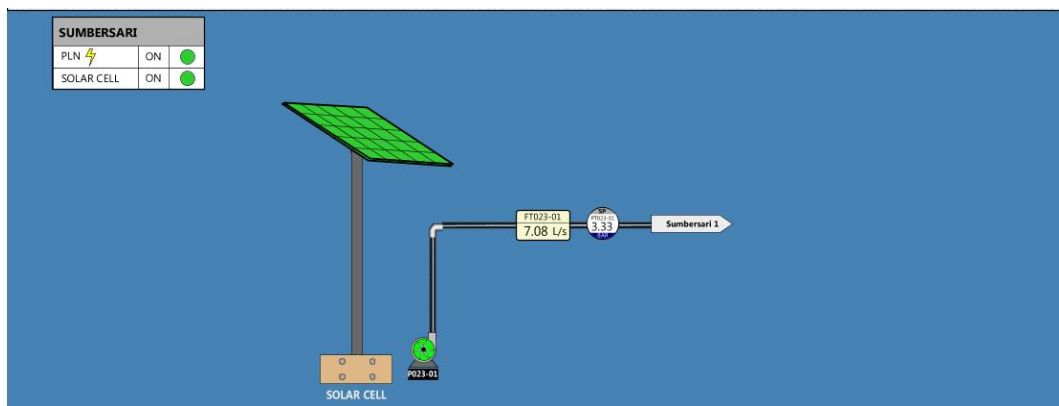
Gambar 2.4 Pompa Sistem Distribusi Sumpster

Pompa terpasang pada gambar di atas langsung mengalirkan air ke pelanggan. Kapasitas rata-rata produksi air pompa tersebut pada bulan Mei sampai dengan Juli 2021 adalah sebesar 6,97 liter/detik. Sampai dengan bulan Agustus 2021, sistem ini memiliki 855 sambungan rumah yang didominasi tipe domestik dengan rata-rata pemakaian 0,49 m³/hari/SR. Pengaliran ke pelanggan menggunakan jaringan pipa tipe cabang dengan jenis bervariasi yaitu GIP, PVC dan

PE. Sistem ini tergolong masih baru karena dibangun pada tahun 2018. Gambaran terkait jaringan distribusi dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Peta Jaringan Perpipa-an Sistem Distribusi Sumbersari



Gambar 2.6 Skema Pelayanan Sistem Distribusi Sumbersari (Sumber : Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang)

Berdasarkan data SIG dari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang, lokasi pelayanan pada Sistem Distribusi Sumbersari memiliki kontur wilayah yang bervariasi pada rentang elevasi 430-463 meter. Adapun lokasi sumur bor dan pompa berada pada ketinggian 452 meter dengan titik SR terjauh pada ketinggian 463 meter. Pelayanan air minum eksisting menggunakan jenis pipa yang yaitu berbeda-beda, yaitu pipa GIP, PVC dan PE. Pipa-pipa tersebut memiliki diameter bervariasi sebesar 50 mm, 75 mm, 100 mm dan 150 mm.

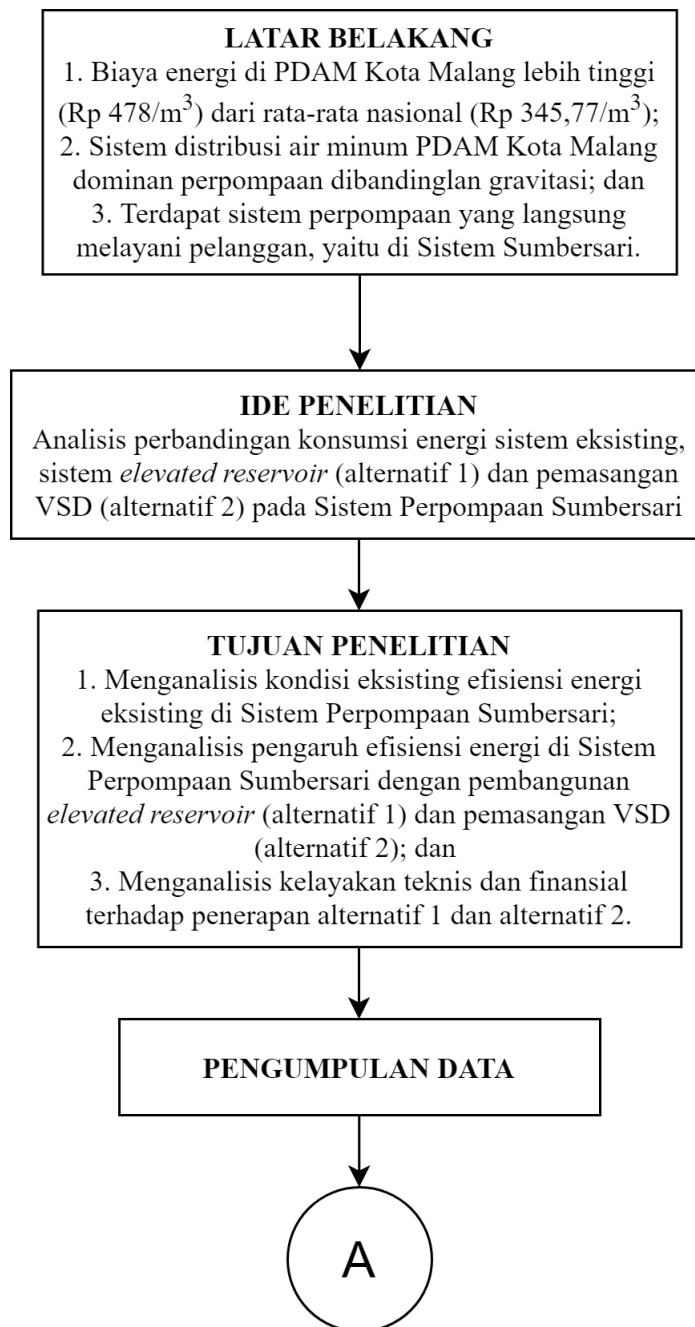
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

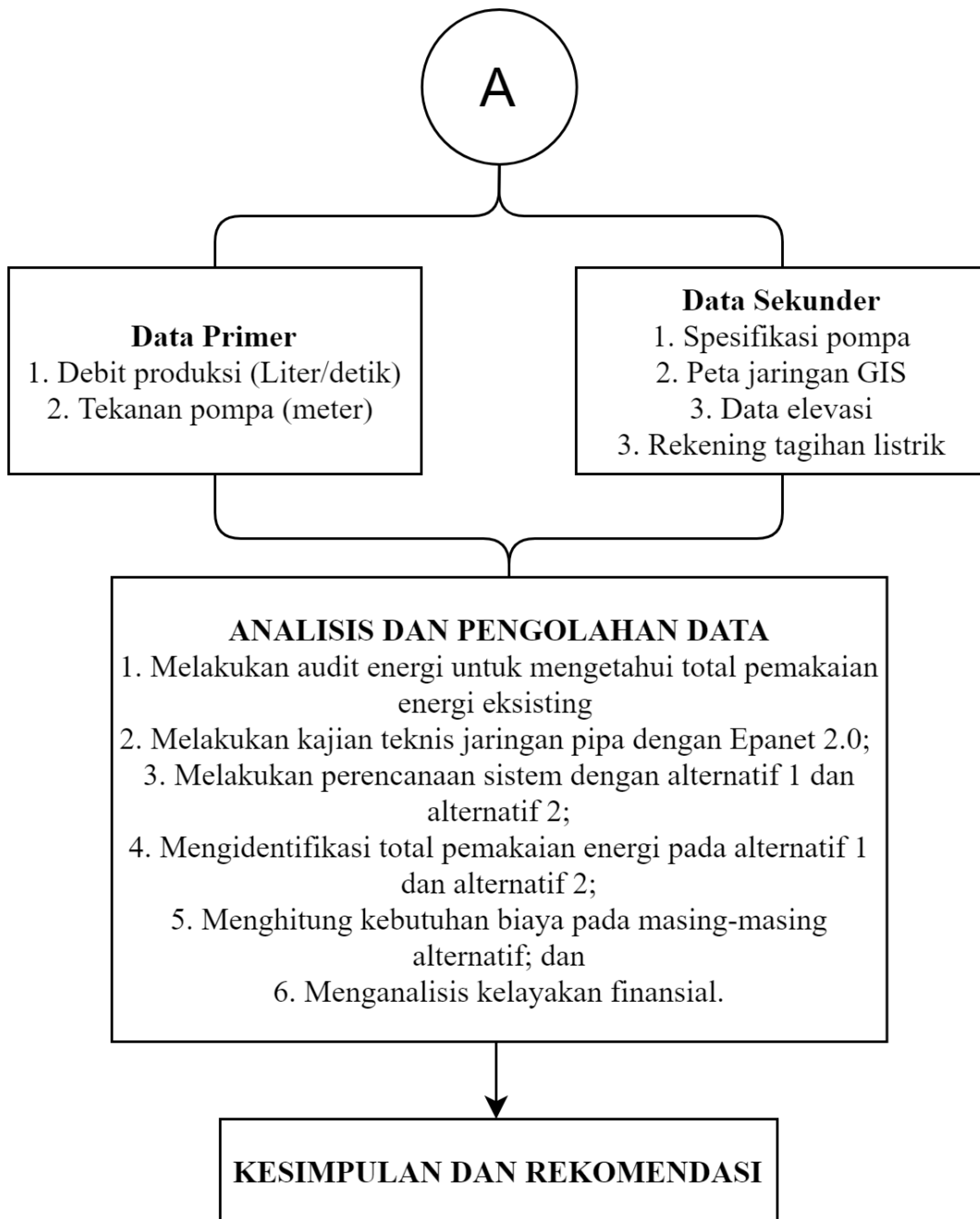
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Penelitian peningkatan efisiensi energi di Sistem Distribusi Sumpersari akan dilakukan dengan tahapan pada kerangka penelitian sebagai berikut:





Gambar 3.1 Kerangka Penelitian Peningkatan Efisiensi Energi di Sistem Perpompaan Sumpersari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang

3.2 Tahapan Penelitian

Penelitian ini secara garis besar terdiri dari 4 (empat) tahapan, yaitu:

3.2.1 Tahapan Persiapan

Tahapan persiapan terdiri dari merumuskan latar belakang, mengidentifikasi permasalahan, merumuskan tujuan penelitian, menentukan ruang lingkup dan batasan serta mencari studi pustaka yang mendukung penelitian.

3.2.2 Tahapan Pengumpulan Data

Pengumpulan data adalah serangkaian kegiatan dalam mengumpulkan seluruh informasi terkait penelitian yang dilakukan. Data yang dikumpulkan terbagi menjadi 2 (dua), yaitu data sekunder dan data primer. Berikut rincian data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini:

Tabel 3. 1 Data-Data Sekunder dan Primer dalam Penelitian

Data Sekunder	Data Primer
Data jaringan perpipaan	Tinjauan lapangan terhadap kondisi fasilitas dan instalasi penunjang
Rekening listik bulanan	Pengukuran debit (<i>flow meter</i>)
Pemakaian genset bulanan	Pengukuran tekanan (<i>head</i>)
Produksi air bulanan	Pengukuran kelistrikan (daya, faktor daya, volt dan ampere, frekuensi)
Denah fasilitas	
Diagram Instalasi perpipaan dan kelistrikan	
Prosedur pengoperasian dan pemeliharaan	
Spesifikasi teknis pompa dan motor	
Peralatan ukur yang terpasang	

3.2.3 Tahapan Analisis dan Pengolahan Data

Analisis dan pengolahan data pada penelitian ini antara lain:

1. Analisis total pemakaian energi listrik sistem eksisting

Total pemakaian energi diketahui dengan melakukan analisis sumber daya. Pengukuran daya di lapangan terlebih dahulu harus mengetahui:

- Daya aktif (P), dalam satuan kW
- Daya nyata (S), dalam satuan kVA
- Daya reaktif (Q), dalam satuan kVar
- Tegangan, dalam satuan volt
- Arus, dalam satuan ampere
- Nilai $\cos \phi$
- Frekuensi, dalam satuan hz

Perhitungan dasar kelistrikan yang digunakan adalah 3 fasa yaitu

$$P = 1,73 \times V_p \times I \times \cos \phi \quad (3.1)$$

dengan

P = Daya efektif (kW)

Up = Tegangan antar fasa (volt)

I = Arus (ampere)

Cos ϕ = faktor daya

Total pemakaian energi listrik dihitung dengan formula

$$\text{Energi Listrik} = P \times t \quad (3.2)$$

dengan

P = Daya efektif (kW)

t = Waktu operasi pompa

Identifikasi apakah sebuah sistem telah efisien atau tidak selanjutnya dilakukan dengan audit energi. Perhitungan pada audit energi dilakukan

dengan mencari *Specific Energy Consumption* (SEC), yaitu dengan membagi seluruh nilai energi yang terpakai atau konsumsi energi (kWH) terhadap nilai produk atau volume produksi air (1000 m³) dalam waktu (bulan atau tahun). Formula yang digunakan adalah $SEC = \text{total energi dalam kWH} / \text{volume produksi dalam m}^3$. Tolak ukur dari SEC adalah < 0,4. Apabila sebuah PDAM mendapatkan nilai di atas 0,4 maka terindikasi tidak efisien dalam memproduksi air minum.

2. Kajian teknis pada jaringan pipa dengan Epanet 2.0

Kajian teknis yang dilakukan meliputi simulasi jaringan pipa eksisting dengan memasukkan data-data jenis pipa, diameter, panjang pipa, debit aliran dan elevasi lokasi penelitian. Selain itu juga dimasukkan data-data *base demand* yang berasal dari volume pemakaian air rata-rata dalam 3 bulan terakhir. Hasil simulasi akan dibandingkan dengan kriteria pada Peraturan Menteri PUPR Nomor 27 tahun 2016, yaitu nilai kecepatan dan tekanan minimum. Adapun kecepatan minimum pada pipa distribusi adalah 0,3 meter/detik dan tekanan minimum adalah 0,5-1 bar pada titik pelayanan terjauh. Tekanan yang digunakan adalah sebesar 0,75 bar atau 7,5 meter sesuai SNI 7509:2011. Melalui kajian teknis ini maka dapat diketahui apakah sistem eksisting di lokasi penelitian dapat mengalirkan air dengan baik atau tidak.

3. Perencanaan *Elevated Reservoir* (alternatif 1) dan pemasangan *Variable Speed Drive* (VSD) (alternatif 2)

a. Perencanaan *Elevated Reservoir*

- Perencanaan reservoir mengacu pada SNI-7509:2011 Tentang Tata Cara Perencanaan Teknik Jaringan Distribusi dan Unit Pelayanan SPAM;
- Identifikasi fluktuasi pemakaian pelanggan selama 24 jam;
- Perhitungan volume reservoir dilakukan dengan metode tabulasi, yaitu membandingkan debit produksi dan pemakaian sehingga didapatkan nilai positif dan negatif terbesar dalam periode waktu

tertentu. Nilai tersebut yang akan menjadi besaran volume reservoir;

- Analisis jaringan distribusi menggunakan perangkat lunak Epanet 2.0. Langkah ini sama halnya dengan langkah pada butir 2, hasil simulasi akan dikaji menggunakan kriteria kecepatan dan tekanan minimum yang harus disediakan oleh sistem.

b. Pemasangan *Variable Speed Driver* (VSD)

- Identifikasi kerja frekuensi minimum motor pompa eksisting melalui data sekunder berupa spesifikasi teknis motor pompa. Nilai rentang kerja frekuensi tersebut sangat penting mengingat apabila pompa bekerja di luar frekuensi yang diperbolehkan maka operasional pompa akan terganggu;
- Identifikasi fluktuasi pemakaian pelanggan selama 24 jam. Identifikasi ini akan menunjukkan pada jam berapa saja VSD dapat dioperasikan agar tidak mengganggu pelayanan kepada pelanggan;
- Perhitungan pengaruh debit, *head*, dan daya pompa saat VSD aktif beroperasi. Perhitungan yang digunakan mengacu pada pendekatan hukum afinitas. Hukum afinitas tersebut menjelaskan hubungan antara debit, tekanan dan daya pada sebuah pompa sebagai berikut (BPMA & Gambica, 2009) :

$$Q \approx n \quad (4.1)$$

$$H \approx n^2 \quad (4.2)$$

$$P \approx n^3 \quad (4.3)$$

dimana

Q = debit (liter/detik)

H = head (meter)

P = daya (kWh)

n = kecepatan putar motor (rpm)

- Analisis jaringan distribusi menggunakan perangkat lunak Epanet 2.0. Hasil simulasi akan dikaji menggunakan kriteria kecepatan dan tekanan minimum yang harus disediakan oleh sistem.

4. Identifikasi total pemakaian energi pada alternatif 1 dan alternatif 2
Tahapan ini dilakukan sama dengan tahapan analisis total pemakaian energi pada sistem eksisting pada butir 1. Pada tahap ini juga dilakukan perhitungan berapa persen peningkatan efisiensi pada masing-masing alternatif. Penghematan tersebut mengacu pada besaran konsumsi listrik dengan skema *Elevated Reservoir* dan skema VSD. Selanjutnya dihitung nilai SEC untuk mengetahui perubahan nilai efisiensi jika kedua alternatif diterapkan.
5. Perhitungan perkiraan biaya pada masing-masing alternatif.
6. Analisis kelayakan finansial jika alternatif 1 dan alternatif 2 di terapkan, meliputi :
 - a. Kondisi eksisting pembiayaan Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang berupa berapa besaran laba bersih terakhir, kondisi internal apakah sehat / kurang sehat / sakit;
 - b. Analisis biaya-manfaat dengan *Benefit Cost Ratio (BCR)*;
 - c. Analisis biaya investasi dengan *Payback Period (PP)*, *Net Present Value (NPV)* dan *Internal Rate of Return (IRR)*; dan
 - d. Strategi pendanaan yang dapat dilakukan Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang dalam hal investasi skema yang disarankan.

3.2.4 Tahapan Penarikan Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan dan saran. Kesimpulan adalah hasil pengumpulan dan analisis data, hasil perbandingan sistem eksisting dan 2 alternatif lain beserta telaah penerapannya berdasarkan aspek finansial. Adapun saran adalah serangkaian masukan dari peneliti yang dapat menjadi masukan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Kondisi Eksisting Sistem Distribusi Sumpersari

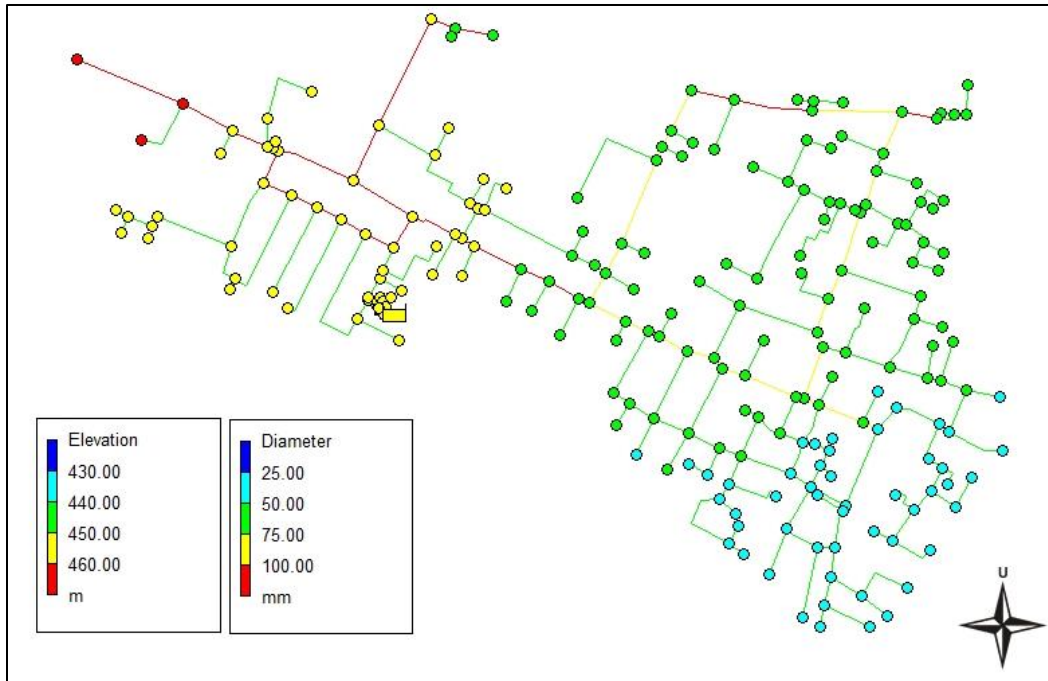
Identifikasi kondisi eksisting meliputi kajian *supply* dan *demand* serta total kapasitas produksi. Data-data yang diperoleh didapat dari data primer dan data sekunder. Data-data primer pada penelitian ini didapatkan dengan pengukuran dengan dokumentasi pada Lampiran A. Data-data primer yang dikumpulkan adalah pemakaian daya pompa, debit produksi (*flow*) dan tekanan pompa. Selain itu, dikumpulkan juga data-data sekunder yang didapat dari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang berupa peta SIG (Sistem Informasi Geografis) yang memuat kontur wilayah, informasi pipa (diamater, panjang dan jenis pipa), lokasi SR (sambungan rumah). Adapun data sekunder lain berupa laporan volume pemakaian pelanggan bulanan dan konsumsi listrik di Sistem Distribusi Sumpersari.

4.1.1 Skema Distribusi Air Minum

Skema pelayanan air minum di Sistem Distribusi Sumpersari menggunakan sistem pengaliran dengan perpompaan dengan jenis *submersible*. Pompa yang digunakan berjumlah 1 buah dengan kapasitas 10 liter/detik, tekanan 40 meter dan daya (P) 11 kWh. Sumber air baku berasal dari sumur bor dengan rata-rata produksi air (Mei-Juli) sebesar 6,97 liter/detik. Pada bulan Agustus 2021, sistem ini memiliki 855 sambungan rumah yang didominasi tipe domestik dengan rata-rata pemakaian 0,49 m³/hari/SR. Pengaliran ke pelanggan menggunakan jaringan pipa tipe cabang. Sistem ini tergolong masih baru karena dibangun pada tahun 2018.

Berdasarkan data SIG dari Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang, lokasi pelayanan pada Sistem Distribusi Sumpersari memiliki kontur wilayah yang bervariasi pada rentang elevasi 430-463 meter. Adapun lokasi sumur bor dan pompa berada pada ketinggian 452 meter dengan titik SR terjauh pada ketinggian 463 meter.

Pelayanan air minum eksisting menggunakan jenis pipa yang yaitu berbeda-beda, yaitu pipa GIP, PVC dan PE. Pipa-pipa tersebut memiliki diameter bervariasi sebesar 50 mm, 75 mm, 100 mm dan 150 mm. Informasi tentang elevasi node dan diameter pipa dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Elevasi Node dan Diameter Jaringan Pipa Eksisting

Berdasarkan gambar di atas sistem pengaliran adalah sistem pemompaan. Penggunaan pompa eksisting berkontribusi dalam hal pengaliran air ke wilayah yang lebih tinggi (node warna kuning dan merah) dan menambah tekanan air ke wilayah pelayanan yang lebih rendah. Dalam hal operasional pompa, aliran air didistribusikan secara langsung ke pelanggan. Sistem ini tidak dilengkapi dengan reservoir sehingga pompa beroperasi terus-menerus selama 24 jam. Operasional pompa ini mengakibatkan kerja pompa mengikuti fluktuasi *demand* di pelanggan, baik di jam minimum maupun di jam maksimum.

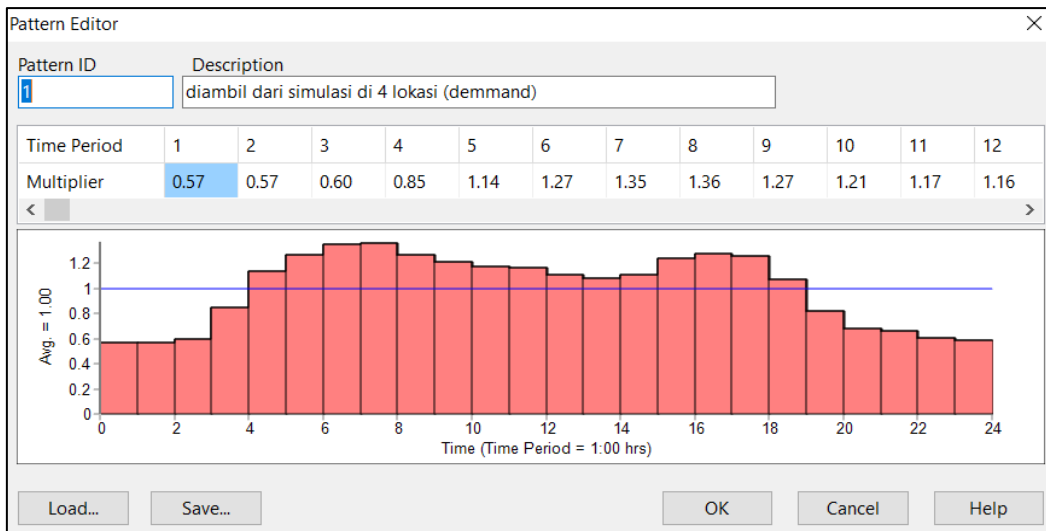
4.1.2 Analisis Jaringan Pipa Eksisting

Analisis jaringan perpipaan pada Sistem Distribusi Sumpersari dilakukan dengan aplikasi Epanet 2.0. Data-data yang dimasukkan pada aplikasi tersebut terdiri atas *base demand* ril berdasarkan tagihan pelanggan pada 3 bulan terakhir (Mei-Juli 2021), data kontur pada daerah pelayanan, data panjang pipa, diameter pipa dan jenis pipa. Data-data tersebut diperoleh dari data sekunder, yaitu data SIG Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang.

Simulasi jaringan di Epanet 2.0 membutuhkan data kurva operasional pompa dan *demand pattern*. Adapun kurva pompa didapat dari data sekunder dengan debit (Q) dan tekanan (H) yang tertera pada Gambar 4.2. *Demand pattern* atau fluktuasi pemakaian pelanggan berdasarkan Gambar 4.3, didapatkan dengan cara melakukan pendekatan perhitungan terhadap debit masuk di lokasi-lokasi inlet *District Meter Area* (DMA) yang memiliki karakteristik serupa dengan pelayanan Sumpersari. Karakteristik serupa yang dimaksud adalah kemiripan dari sisi jumlah pelanggan dan kebocoran. Hal ini dilakukan karena adanya keterbatasan data dalam penelitian ini karena tidak tersedianya alat ukur debit untuk mengetahui pemakaian pelanggan. *Demand pattern* tersebut adalah perilaku pemakaian pelanggan yang dipengaruhi oleh berbagai faktor yaitu keadaan geografis, tipe komunitas, keadaan ekonomi, tekanan air, biaya, sistem manajemen dan konservasi air (Tchobanoglous dkk., 1985).

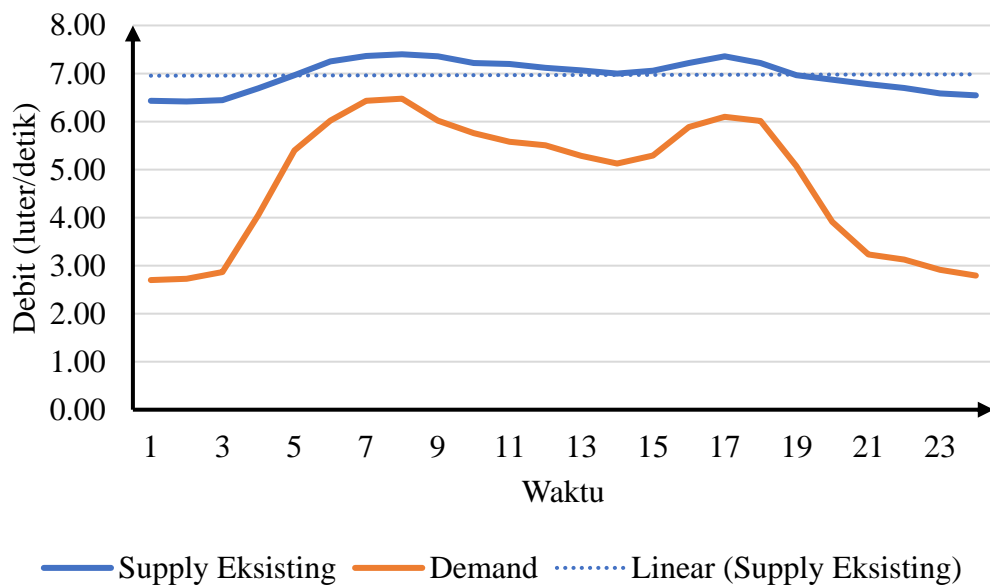


Gambar 4.2 Kurva Pompa Submersible Merk Vansan



Gambar 4.3 Demand Patern (Fluktuasi Pemakaian Air Pelanggan)

Operasional pompa di Sistem Distribusi Summersari memproduksi air lebih besar dibandingkan dengan kebutuhan pelanggan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada gambar tersebut sangat terlihat bahwa pompa beroperasi melebihi dari kebutuhan. Pompa memproduksi air secara konstan dengan rata-rata produksi 6,97 liter/detik, baik pada saat pemakaian maksimum maupun pada saat pemakaian minimum.



Gambar 4.4 Sistem Aliran Jaringan Pipa Eksisting

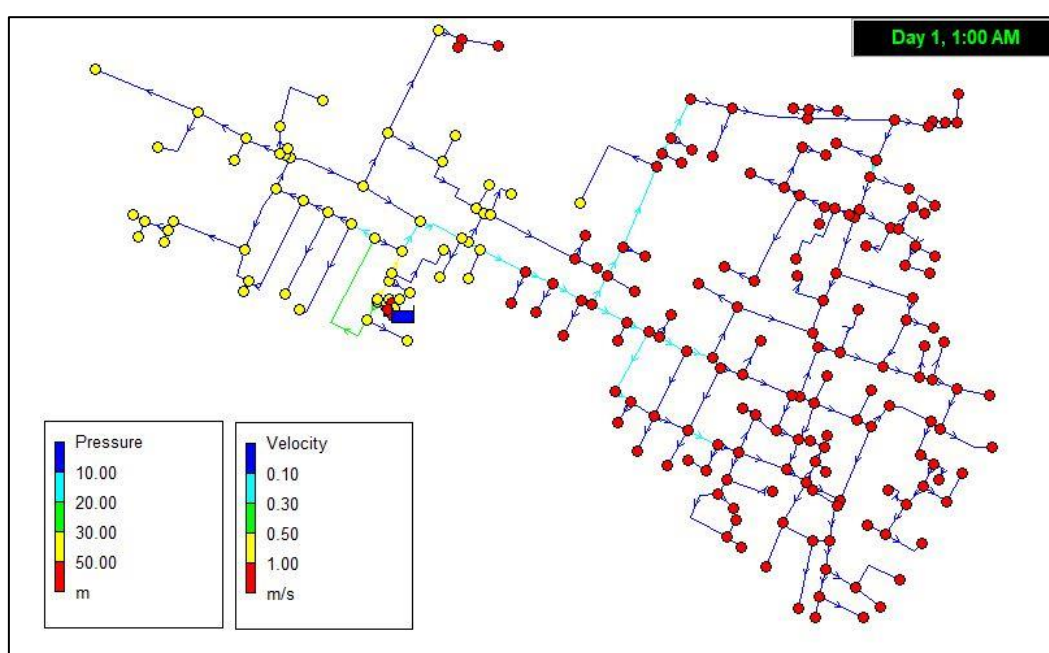
Kajian teknis jaringan perpipaan pada penelitian ini menggunakan kriteria nilai *pressure* dan kecepatan aliran. Seluruh jaringan pipa digambar ulang dan disimulasikan di Epanet 2.0. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa jaringan pipa eksisting selama periode 24 jam dapat dikatakan baik berdasarkan kriteria *pressure*. Kriteria *pressure* pada seluruh wilayah pelayanan telah memenuhi syarat minimum yang dipersyaratkan yaitu di atas 0,75 bar. Kriteria *pressure* yang digunakan adalah minimum 0,75 bar (7,5 meter) sesuai dengan SNI 7509: 2011 dan Permen PU Nomor 27 Tahun 2016.

Hasil simulasi pada kriteria *pressure* berbeda dengan kriteria kecepatan. Kriteria kecepatan pada jaringan pipa tidak tercapai pada sebagian besar wilayah pelayanan karena menunjukkan nilai dibawah nilai minimum yang dipersyaratkan sebesar 0,3 meter/detik. Kriteria kecepatan yang digunakan adalah minimum 0,3

meter/detik sesuai dengan Permen PU Nomor 27 Tahun 2016. Adapun hasil simulasi jaringan pada jam minimum dan maksimum adalah sebagai berikut:

A. Jaringan Pipa pada Jam Minimum

Jam-jam pemakaian minimum di Sistem Distribusi Sumpersari berada pada pukul 19:00 sampai dengan 04:00 dimana pemakaian pelanggan memiliki faktor pemakaian < 1 . Titik paling minimum berada pada pukul 00:00-01:00 dengan faktor pemakaian berada pada nilai terendah, yaitu 0,57. Pada periode tersebut didapatkan hasil simulasi di aplikasi Epanet 2.0 seperti pada Gambar 4.5.

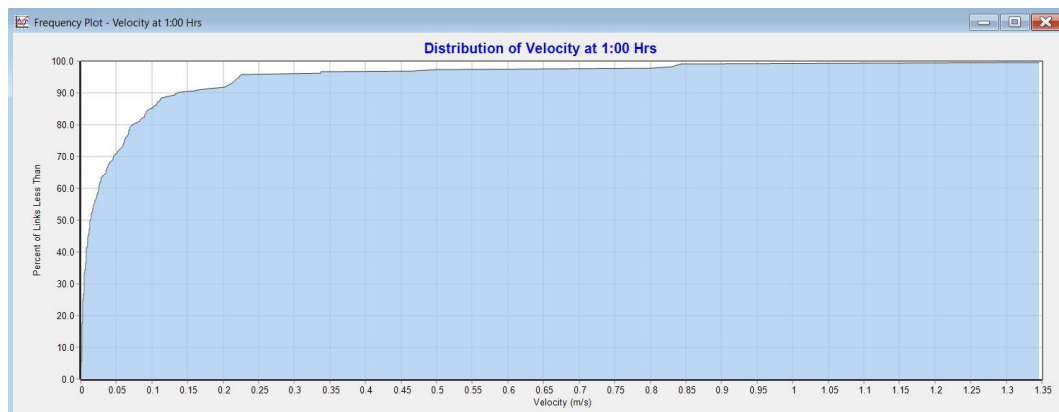


Gambar 4.5 Hasil Simulasi Jaringan Eksisting pada Jam Minimum

Berdasarkan gambar di atas, pada saat jam minimum jaringan pipa dapat mengalirkan air ke seluruh pelanggan karena setiap node memiliki sisa tekan (*pressure*) yang cukup. Sisa tekan di seluruh jaringan pipa telah terpenuhi karena sudah melebihi kriteria minimum 0,75 bar (7,5 meter) yang dipersyaratkan oleh SNI 7509:2011 dan Permen PUPR Nomor 27 Tahun 2016.

Berkaitan dengan sisa tekan tersebut, pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa pelanggan di Sistem Distribusi Sumpersari yang berada pada dengan elevasi yang lebih tinggi dibandingkan elevasi sumur memiliki tekanan antara 30-50 meter (warna kuning) sedangkan pelanggan yang cenderung berada pada elevasi datar atau sama dengan sumur dan pelanggan yang berada di bawah elevasi sumur

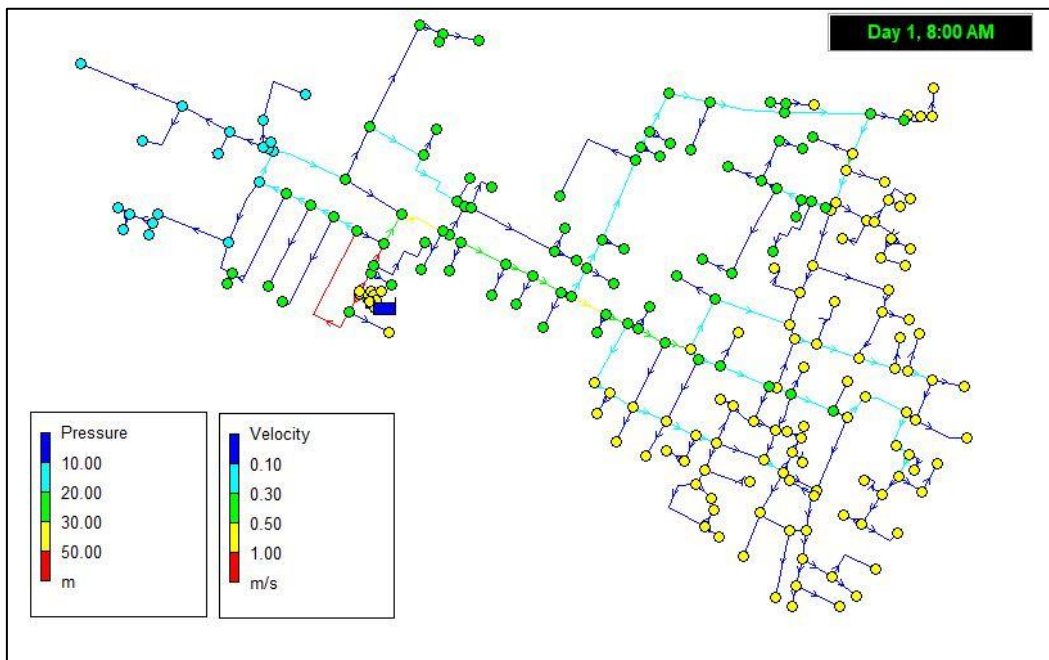
memiliki tekanan lebih besar yaitu di atas 50 meter (warna merah). Namun, mengacu pada Peraturan Menteri PUPR Nomor 27 Tahun 2016, kriteria kecepatan minimum sebesar 0,3 meter/detik tidak terpenuhi karena hampir seluruh wilayah pelayanan memiliki kecepatan di bawah 0,3 meter/detik (warna biru muda dan biru tua), hanya terdapat sebagian kecil segmen jaringan pipa yang memenuhi (warna hijau) yaitu pipa yang berlokasi dekat dengan sumur. Gambar 4.6 adalah grafik *frequency plot* yang didapat pada aplikasi Epanet. Gambar tersebut menunjukkan bahwa di jam minimum, sebanyak 95% jaringan pipa memiliki kecepatan di bawah 0,3 meter/detik. Kinerja jaringan pipa eksisting pada jam minimum tidak dapat dikatakan baik walaupun dapat mengalirkan air keseluruhan pelanggan karena terdapat kriteria yang tidak memenuhi, yaitu kriteria kecepatan. Nilai kecepatan yang kecil disebabkan oleh pemasangan diameter pipa yang besar untuk mengantisipasi kebutuhan pertumbuhan pelanggan.



Gambar 4.6 Grafik *Frequency Plot* Kecepatan Aliran pada Jam Minimum

B. Jaringan Pipa pada Jam Maksimum

Jam maksimum pemakaian di Sistem Distribusi Sumpersari dimulai pada pukul 04:00 sampai dengan 19:00 dimana pemakaian pelanggan memiliki faktor pemakaian > 1 . Waktu pemakaian paling tinggi berada pada pukul 07:00-08:00 dengan faktor pemakaian sebesar 1,36. Dalam menilai jaringan pada saat jam maksimum juga digunakan kriteria yang sama yaitu tekanan (*pressure*) adalah minimum 1 bar (10 meter) dan kecepatan berkisar 0,3 meter/detik.

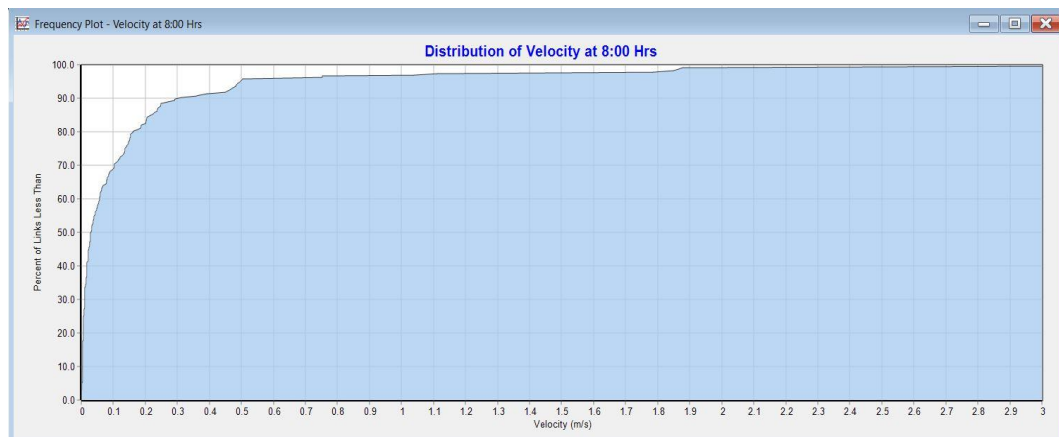


Gambar 4.7 Hasil Simulasi Jaringan Eksisting pada Jam Maksimum

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi jaringan eksisting pada saat jam maksimum dengan aplikasi Epanet 2.0. Sama halnya dengan jam minimum, berdasarkan gambar tersebut sistem ini dapat mengalirkan air ke seluruh pelanggan karena setiap node memiliki sisa tekanan (*pressure*), dimana kriteria tekanan di seluruh jaringan pipa telah terpenuhi minimum 0,75 bar (7,5 meter).

Berkaitan dengan kriteria *pressure*, pelanggan yang berada pada dengan elevasi yang lebih tinggi dibandingkan elevasi sumur memiliki tekanan yang berkisar antara 10-20 meter (warna biru muda), pelanggan yang cenderung berada pada elevasi datar atau sama dengan sumur memiliki tekanan antara 20-30 (warna hijau), sedangkan pelanggan yang berada di bawah elevasi sumur memiliki tekanan lebih besar yaitu di atas 30-50 meter (warna kuning). Nilai dari *pressure* di jam maksimum lebih rendah dibandingkan nilai *pressure* di jam minimum, hal ini dikarenakan di jam-jam tersebut terdapat lebih banyak pemakaian air. Namun kriteria lain yaitu kriteria kecepatan minimum sebesar 0,3 meter/detik tidak terpenuhi karena sebagian wilayah pelayanan memiliki kecepatan di bawah 0,3 meter/detik (warna biru muda dan biru tua), segmen jaringan pipa yang memenuhi (warna hijau) yaitu pipa yang berlokasi dekat dengan sumur. Gambar 4.8 adalah grafik *frequency plot* yang didapat dari Epanet 2.0. Gambar tersebut menunjukkan

bahwa di jam maksimum, sebanyak 90% jaringan pipa memiliki kecepatan di bawah 0,3 meter/detik. Dari hasil *frequency plot* parameter kecepatan sebesar 90%, terdapat peningkatan 5% kriteria terpenuhi dari semula tidak memenuhi sebanyak 95% di jam minimum. Namun kinerja jaringan pipa eksisting pada jam maksimum juga sama dengan jam minimum, yaitu tidak dapat dikatakan baik walaupun dapat mengalirkan air keseluruhan pelanggan karena terdapat kriteria yang tidak memenuhi, yaitu kriteria kecepatan.



Gambar 4.8 Grafik *Frequency Plot* Kecepatan Aliran pada Jam Maksimum

4.1.3 Efisiensi Energi Eksisting

A. Total Energi dan Tagihan Listrik

Pengukuran lapangan dilakukan dengan menggunakan *power meter* untuk parameter kelistrikan dan alat ukur *flow* dan tekanan di SCADA untuk paramater hidrolis. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Data Hidrolis dan Kelistrikan Sistem Distribusi Summersari

Pengukuran	Nilai	Satuan
Debit	6.97	liter/detik
<i>Head (Discharge)</i>	3.13	bar
Frekuensi	50	Hz
Daya	9.35	kWh

Sumber : Hasil Pengukuran (2021)

Berdasarkan data-data hasil pengukuran di atas, operasional pompa di Sistem Distribusi Summersari secara terus-menerus selama 24 jam mengkonsumsi energi listrik sebesar 9,35 kWh atau 6881,47 kWh dalam 1 bulan. Sistem ini

termasuk dalam kategori B2 dengan tarif listrik per kWh sebesar Rp 1444,7. Pada kategori B2 berlaku tarif 1 harga atau tidak ada perbedaan tarif saat Waktu Beban Puncak (WBP) dan Luar Beban Puncak (LWBP). Adapun total tagihan yang harus dibayarkan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang adalah sebesar Rp 9.941.662 setiap bulannya.

B. *Specific Energy Consumption*

Nilai SEC mencerminkan perbandingan antara nilai energi yang terpakai terhadap volume produksi air yang dihasilkan dalam periode waktu tertentu. SEC didapatkan dengan cara melakukan audit energi. Pengukuran SEC dilakukan dengan membagi seluruh nilai energi yang terpakai atau konsumsi energi (kWh) terhadap nilai produk atau volume produksi air (m^3) dalam waktu (bulan).

Pengukuran lapangan dengan menggunakan *power meter* menunjukkan rata-rata energi listrik harian pada Sistem Distribusi Summersari adalah sebesar 9,35 kWh atau 6881,47 kWh dalam 1 bulan. Sedangkan produksi air berdasarkan rata-rata 3 bulan terakhir PDAM Malang (Mei-Juli 2021) adalah sebesar 18.071 m^3 /bulan. Berdasarkan kedua angka tersebut didapatkan nilai SEC pada sistem ini adalah 0,38 kWh/ m^3 . Sebuah sistem dapat dikatakan efisien apabila nilai SEC berada di bawah 0,4 kWh/ m^3 (Balai Teknik Air Minum, 2019).

4.2 Perencanaan *Elevated Reservoir*

Perencanaan reservoir pada Sistem Distribusi Summersari nantinya akan berfungsi sebagai tampungan air. Dibangunnya reservoir pada sebuah sistem air minum sangat penting, karena aliran air yang terjadi tidak statis dimana pada jam tertentu air yang dibutuhkan lebih kecil dari debit rata-rata pemakaian, akan tetapi pada jam tertentu air yang dibutuhkan lebih besar (Kusumajati *dkk.*, 2016). Sama halnya yang terjadi di Sistem Distribusi Summersari, kerja pompa berfluktuasi terhadap pemakaian pelanggan. Setelah reservoir terbangun, reservoir ini akan menyeimbangkan antara debit input (produksi) dan debit pemakaian air (output) yang senantiasa berfluktuasi selama 24 jam (BSN, 2011) dimana pemakaian air yang berfluktuasi tersebut juga terjadi di Sistem Distribusi Summersari, seperti yang tertera pada Gambar 4.3. Selain untuk menyeimbangkan, fungsi reservoir akan

meratakan aliran, mengatur tekanan dan juga untuk keperluan darurat seperti kebakaran (Taini & Purnomo, 2017).

4.2.1 Dimensi *Elevated Reservoir*

A. *Volume Elevated Reservoir*

Perhitungan volume reservoir dilakukan dengan metode tabulasi, dimana volume reservoir adalah jumlah dari selisih positif terbesar (m^3) dengan selisih negatif terbesar (m^3) antara fluktuasi pemakaian air (output) dan pasokan air (input). Hasil perhitungan volume reservoir di Sistem Distribusi Summersari disajikan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Volume Reservoir pada Sistem Distribusi Summersari

Jam	Vol Supply (m^3)	Pemakaian		Volume Defisit (m^3)	Volume Surplus (m^3)	Kumulatif Supply (m^3)	Kumulatif pemakaian (m^3)	Selisih (m^3)
		Faktor	Vol. (m^3)					
01:00	0.00	0.57	9.72	-9.72	0.00	0.00	9.72	-9.72
02:00	25.11	0.57	9.80	0.00	15.30	25.11	19.52	5.59
03:00	25.11	0.60	10.32	0.00	14.79	50.21	29.84	20.38
04:00	25.11	0.85	14.59	0.00	10.51	75.32	44.43	30.89
05:00	25.11	1.14	19.44	0.00	5.67	100.43	63.87	36.56
06:00	25.11	1.27	21.66	0.00	3.45	125.53	85.53	40.01
07:00	25.11	1.35	23.14	0.00	1.96	150.64	108.67	41.97
08:00	25.11	1.36	23.31	0.00	1.79	175.75	131.99	43.76
09:00	25.11	1.27	21.67	0.00	3.43	200.85	153.66	47.20
10:00	25.11	1.21	20.74	0.00	4.37	225.96	174.40	51.57
11:00	25.11	1.17	20.09	0.00	5.02	251.07	194.49	56.58
12:00	25.11	1.16	19.82	0.00	5.29	276.17	214.31	61.87
13:00	25.11	1.11	19.03	0.00	6.08	301.28	233.34	67.94
14:00	25.11	1.08	18.46	0.00	6.65	326.39	251.80	74.59
15:00	25.11	1.11	19.05	0.00	6.06	351.50	270.85	80.65
16:00	25.11	1.24	21.18	0.00	3.93	376.60	292.03	84.57
17:00	25.11	1.28	21.96	0.00	3.15	401.71	313.98	87.72
18:00	25.11	1.26	21.64	0.00	3.47	426.82	335.62	91.19
19:00	0.00	1.07	18.25	-18.25	0.00	426.82	353.87	72.95
20:00	0.00	0.82	14.08	-14.08	0.00	426.82	367.95	58.87
21:00	0.00	0.68	11.64	-11.64	0.00	426.82	379.58	47.23
22:00	0.00	0.66	11.24	-11.24	0.00	426.82	390.83	35.99
23:00	0.00	0.61	10.49	-10.49	0.00	426.82	401.32	25.50
24:00	0.00	0.59	10.06	-10.06	0.00	426.82	411.38	15.43

Sumber : Hasil Perhitungan (2021)

Berdasarkan tabel di atas maka volume reservoir minimum di pelayanan Sistem Distribusi Sumbersari adalah sebesar $100,6 \text{ m}^3$ yang dihitung dengan menjumlahkan selisih minus terbesar ($9,72 \text{ m}^3$) dengan selisih plus terbesar ($91,19 \text{ m}^3$). Volume ini ditambahkan sebesar 12 m^3 untuk keperluan pemadam kebakaran, dengan mengasumsikan kebutuhan minimum hidran sebesar 400 liter/menit selama 30 menit (Haramain dkk., 2017), dan 15% volume kebocoran berdasarkan capaian kebocoran fisik Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. Oleh karena itu volume total yang harus disediakan pada sistem ini adalah sebesar 129 m^3 . Bentuk *Elevated Reservoir* direncanakan berupa tabung dengan diameter 6,25 meter dan tinggi 4,5 meter.

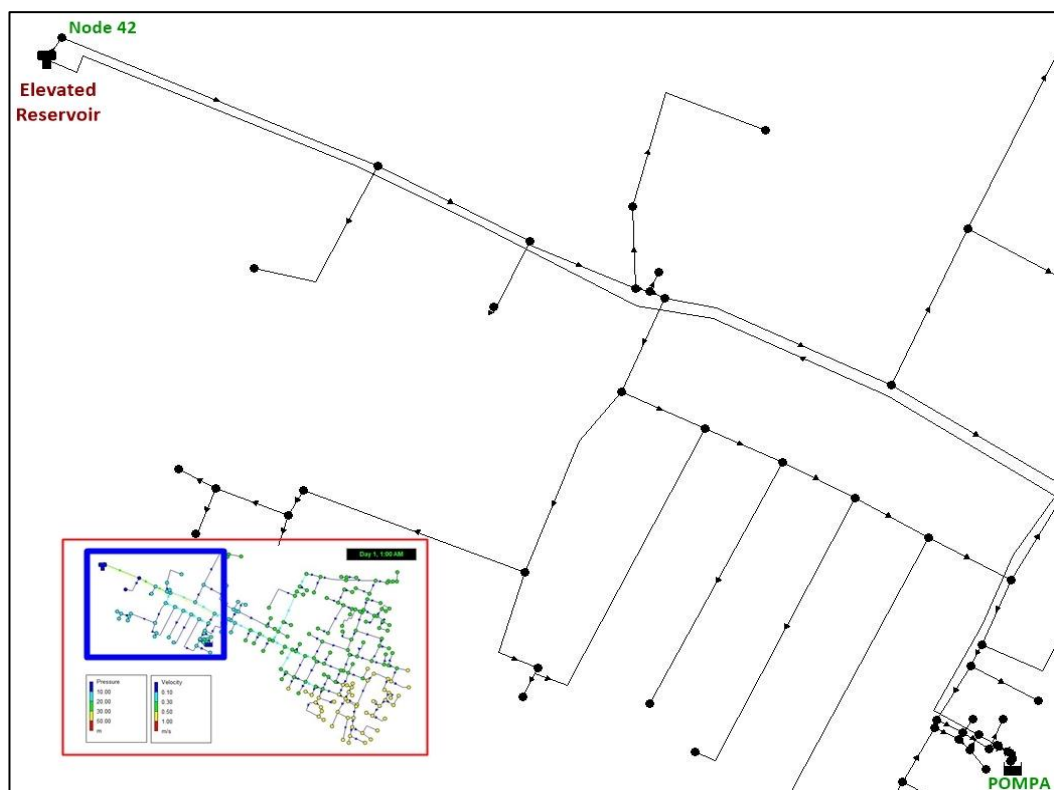
Tabel 4.2 di atas juga menunjukkan perbandingan antara volume *supply* dan volume pemakaian yang tidak seimbang, yaitu terdapat selisih sebesar $15,43 \text{ m}^3$ setiap harinya. Selisih tersebut adalah volume kelebihan dari *supply* yang tidak terpakai. Kelebihan *supply* tersebut dapat diatasi dengan penambahan sensor berupa *Water Level Control (WLC)* sebagai instrumen untuk mencegah terjadinya luapan. Sensor tersebut akan disambungkan ke program SCADA, dimana sistem ini memungkinkan skema kontrol yang terpusat (Predescu dkk., 2020).

B. Ketinggian *Elevated Reservoir*

Ketinggian *Elevated Reservoir* ditentukan berdasarkan simulasi aliran air di aplikasi Epanet 2.0. Ketinggian tersebut adalah nilai *negative pressure* terbesar pada saat jam puncak pemakaian. Jam puncak pemakaian pelanggan di Sistem Distribusi Sumbersari sendiri berada pada jam 08.000 dengan nilai faktor puncak sebesar 1,363. Pada saat jam puncak tersebut tekanan yang dibutuhkan untuk mengalirkan air ke titik terjauh (node nomor 42) adalah sebesar 24,59 meter. Nilai *negative pressure* berarti apabila reservoir di letakkan di dekat pompa maka tinggi minimumnya adalah sebesar 25 meter. Secara teknis ketinggian *Elevated Reservoir* tersebut bisa diterapkan. Namun dengan memperhatikan wilayah sekitar berupa permukiman warga maka peletakan reservoir sebaiknya berada pada titik tertinggi dari pelayanan agar ketinggian reservoir dapat lebih rendah. Berdasarkan kajian dari kontur wilayah pelayanan maka penempatan reservoir direncanakan pada titik

elevasi 463 meter yang berdekatan dengan titik terjauh pelayanan dari sumur yaitu node nomor 42.

Penentuan ketinggian *Elevated Reservoir* di lokasi yang dipilih dilakukan dengan cara melakukan simulasi pada aplikasi Epanet 2.0. Acuan penentuan ketinggian tersebut adalah terpenuhinya kriteria *pressure* di titik kritis pelanggan pada saat jam puncak sebesar 0,75 bar (7,5 meter) pada jam puncak. Melalui simulasi pada aplikasi Epanet 2.0, dihasilkan nilai ketinggian sebesar 7 meter sehingga *Elevated Reservoir* berada pada ketinggian 470 meter (463 meter muka tanah dan 7 meter bangunan menara). Penempatan dan penentuan ketinggian reservoir menghasilkan sisa tekanan yang telah memenuhi kriteria minimum 7 meter, yaitu sebesar 9,49 meter di titik kritis pada saat jam puncak.

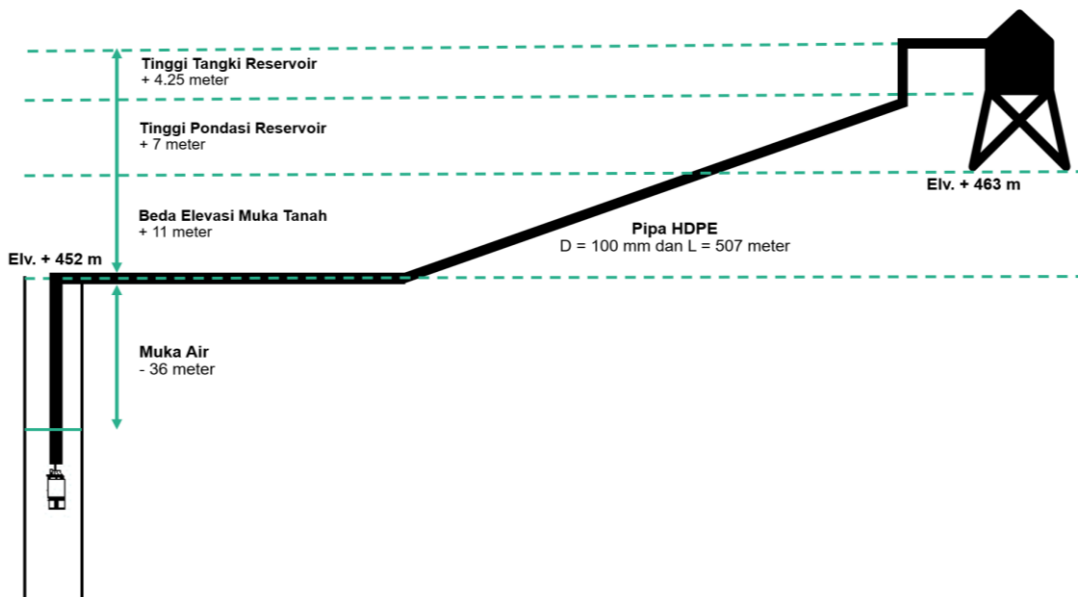


Gambar 4.9 Rencana Penempatan *Elevated Reservoir*

Gambar 4.9 di atas menunjukkan lokasi penempatan *Elevated Reservoir*. Lokasi tersebut berada pada titik tertinggi pelayanan, yaitu berdekatan dengan node terjauh (node 42). Berdasarkan gambar di atas, pembangunan *Elevated Reservoir* membutuhkan penambahan jaringan pipa transmisi baru. Pipa transmisi tersebut

akan mengalirkan air dari sumber (sumur) menuju ke lokasi reservoir sepanjang 507 meter. Jenis pipa yang digunakan adalah HDPE dengan diameter 100 mm.

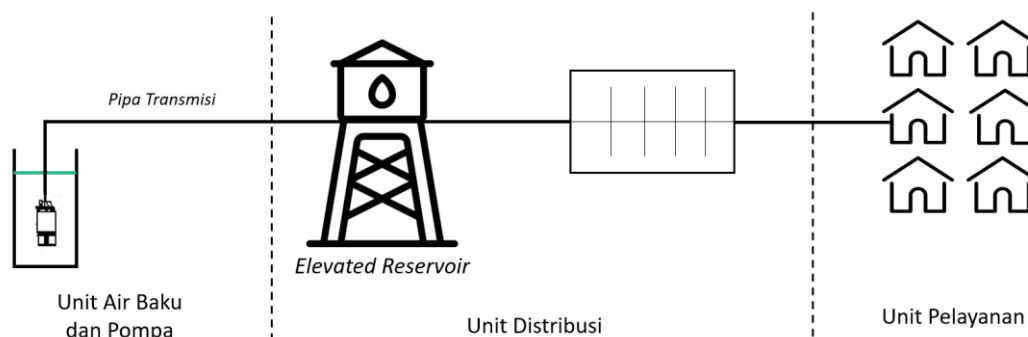
Jaringan transmisi disimulasikan dengan aplikasi Epanet 2.0 untuk mengetahui apakah pompa mampu mengalirkan air ke titik tersebut. Hasil simulasi Epanet menunjukkan bahwa pompa eksisting mampu mengalirkan air dan juga mengisi reservoir. Kapasitas pompa sebesar 6,97 liter/detik dan *head* total 67,3 meter (*head discharge* 31,3 meter dan *head suction* 36 meter) masih lebih besar dibandingkan kebutuhan *head total* sebesar 63,2 meter yang terdiri dari *head discharge* untuk mengantarkan air ke titik reservoir sebesar 27,2 meter dan *head suction* sebesar 36 meter. *Head discharge* sebesar 27,2 meter pada jaringan transmisi tersebut adalah besaran *headloss* pipa berdasarkan simulasi pada Epanet. Perhitungan *headloss* pipa dengan rumus *hazzen-williams* pada Lampiran B juga menunjukkan hal serupa, bahwa pompa eksisting mampu mengalirkan air ke lokasi reservoir. Berdasarkan perhitungan tersebut *head* total yang dibutuhkan untuk mengalirkan air adalah sebesar 28,49 meter.



Gambar 4.10 Skema Aliran Pipa Transmisi dari Pompa ke *Elevated Reservoir*

Alternatif pembangunan *Elevated Reservoir* akan mengubah skematik pelayanan eksisting. Pelayanan eksisting dengan pompa langsung mengalirkan air ke pelanggan diubah menjadi aliran dari pompa menuju bak reservoir terlebih

dahulu. Selanjutnya dari reservoir tersebut dialirkan secara gravitasi ke wilayah pelayanan. Skematik pelayanan digambarkan pada Gambar 4.11 sebagai berikut:



Gambar 4.11 Skematik Pelayanan Air Minum di Sistem Distribusi Sumbersari dengan Penambahan *Elevated Reservoir*

4.2.2 Analisis Efisiensi Energi

A. Total Energi dan Tagihan Listrik

Pembangunan *Elevated Reservoir* di Sistem Distribusi Sumbersari akan mengurangi jam operasional pompa. Menurut Salomons dan Housh (2020) pengaturan jadwal jam operasional pompa (*pump scheduling*) merupakan salah satu strategi yang baik dalam hal mengurangi pemakaian energi. Berdasarkan perhitungan volume reservoir pada Tabel 4.2, operasional pompa akan berkurang semula 24 jam pada sistem eksisting berubah menjadi 17 jam dengan adanya reservoir. Operasional pompa direncanakan akan berhenti atau berada pada kondisi mati (*off*) dimulai pada pukul 19:00 sampai dengan 01:00 setiap harinya.

Pengurangan waktu operasional berpengaruh pada penurunan pemakaian energi listrik dari semula 6881,47 kW/bulan menjadi 4821,48 kW/bulan. Penurunan pemakaian energi listrik di Sistem Distribusi Sumbersari akan mengurangi tagihan listrik sebesar 29,94%. Penurunan tagihan tersebut membuat Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang akan menghemat Rp 2.976.000 setiap bulannya. Penurunan biaya energi pada penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa manajemen energi dengan operasional pompa dapat menurunkan biaya energi (Loganthurai dkk., 2012). Selain biaya energi, manfaat lain yang didapat dengan penjadwalan pompa akan mengurangi biaya perawatan dan permintaan penggantian pompa (Abdelsalam & Gabbar, 2021).

B. *Specific Energy Consumption*

Pengukuran SEC dilakukan dengan membagi seluruh nilai energi yang terpakai dengan skema *Elevated Reservoir* (kWh) terhadap nilai produk atau volume produksi air (m³) dalam waktu (bulan). Produksi air dan besaran energi listrik yang terpakai dengan reservoir masing-masing adalah 12.947 m³/bulan dan 4821,48 kWh dalam 1 bulan. Berdasarkan kedua angka tersebut didapatkan nilai SEC pada skema ini adalah 0,37 kWh/m³. Nilai SEC tersebut meningkat dibandingkan dengan sistem eksisting tanpa menggunakan *Elevated Reservoir* (SEC = 0,38 kWh/m³).

4.3 Perencanaan *Variable Speed Drive* (VSD)

Prinsip kerja VSD adalah mengubah *input* motor (listrik AC) menjadi DC dan kemudian menjadi AC lagi dengan *output* frekuensi yang dikehendaki (Anindita dkk., 2016). Penggunaan *Variable Speed Drive* (VSD) pada sebuah sistem perpompaan memberikan keuntungan berupa tidak terjadi kelebihan tekanan, terjadi penghematan energi dan mengurangi biaya operasional (Suparno, 2013). Apabila proses kerja motor melalui VSD bisa disesuaikan dengan kebutuhan maka sistem menjadi lebih efisien karena tidak akan ada energi yang terbuang (Kusuma, 2020).

Kebutuhan untuk mencapai sistem perpompaan yang efisien muncul karena adanya permintaan air (*demand*) yang bervariasi (Sunela, 2017). Sama halnya di Sistem Distribusi Summersari, yaitu diperlukan menurunkan frekuensi motor berdasarkan data fluktuasi pelanggan, dimana ketika *demand* di pelanggan berada pada jam minimum (malam hari) maka frekuensi motor pompa juga akan bekerja minimum.

Pemilihan VSD memperhatikan spesifikasi teknis dari motor pompa eksisting yang telah terpasang. Daya motor pompa eksisting adalah 11 kWh sehingga dipilih VSD dengan daya motor sebesar 15 kWh, dimana pelatakannya berada pada box panel eksisting. Operasional VSD akan dijalankan pada rentang frekuensi yang diperbolehkan yaitu minimum 30. Adapun perencanaan VSD lebih lengkap akan mengikuti data motor dan pompa di Sistem Distribusi Summersari sesuai dengan Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Motor dan Pompa di Sistem Distribusi Summersari

Kriteria	Nilai	Satuan	Sumber Data
Frekuensi act. (f)	50	Hz	Spesifikasi teknis
Frekuensi min. (f)	30	Hz	Spesifikasi teknis
Debit avg. (Q)	6.97	lps	Data primer
Head discharge (H)	3.13	bar	Data primer
Head suction (H)	3.6	bar	Data sekunder
Kecepatan rotor (Nr)	2900	rpm	Spesifikasi teknis
Jumlah pole	2	buah	Spesifikasi teknis
Daya motor	11	kWh	Spesifikasi teknis
Daya rata-rata (P)	9.35	kWh	Data primer
Arus rata-rata (I)	14.69	Ampere	Data primer

4.3.1 Pengaruh VSD terhadap Debit, Head dan Daya

Penerapan VSD dengan merubah frekuensi motor (hz) akan mempengaruhi kecepatan putar motor (rpm). Hal ini akan mempengaruhi kinerja secara keseluruhan, Doe (2004) menjelaskan bahwa pengaruh kecepatan putar terhadap kinerja pompa secara keseluruhan dikenal dengan hukum afinitas. Hukum afinitas memungkinkan terbentuknya kurva pompa baru untuk kecepatan yang berbeda (Moreira & Ramos, 2013). Perubahan kecepatan putar tersebut akan berdampak pada pengurangan daya pompa (Vogelesang, 2009).

Perhitungan pengaruh debit (Q), head (H) dan Daya (P) dapat dilihat pada Lampiran C. Secara keseluruhan perhitungan hubungan antara frekuensi terhadap debit (Q), head (H) dan Daya (P) disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hubungan Antara Perubahan Frekuensi dengan Q, H, dan P

Frekuensi (Hz)	Ns (rpm)	Nr (rpm)	Q (lps)	H (bar)	P (kWh)
50	3000	2900	6.97	6.73	9.35
49	2940	2842	6.83	6.47	8.80
48	2880	2784	6.70	6.20	8.27
47	2820	2726	6.56	5.95	7.77
46	2760	2668	6.42	5.70	7.28
45	2700	2610	6.28	5.45	6.82
44	2640	2552	6.14	5.21	6.37
43	2580	2494	6.00	4.98	5.95

Frekuensi (Hz)	Ns (rpm)	Nr (rpm)	Q (lps)	H (bar)	P (kWh)
42	2520	2436	5.86	4.75	5.54
41	2460	2378	5.72	4.53	5.16
40	2400	2320	5.58	4.31	4.79

Sumber : Hasil Perhitungan (2021)

Berdasarkan pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan pada daya pompa jika frekuensi motor diturunkan. Semakin kecil frekuensi maka daya yang dihasilkan juga semakin kecil. Hasil pada tabel di atas sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Moreira dan Ramos (2013) dimana pengurangan 10% kecepatan pompa memberika penurunan sebesar 27% daya dan penurunan *head* pompa sebesar 19%.

4.3.2 Pemilihan Frekuensi Kerja VSD

Hasil yang disajikan pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa penurunan frekuensi kerja motor berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi, dimana daya listrik yang dikonsumsi menjadi semakin kecil. Apabila dihubungkan dengan pelayanan air minum pada Sistem Distribusi Summersari, tidak seluruh pengaturan frekuensi tersebut dapat diterapkan. Penerapan VSD pada lokasi penelitian mempertimbangkan hal sebagai berikut:

1. Debit minimum yang harus disediakan pompa ketika VSD aktif. Nilai ini berdasarkan *demand* pelanggan pada saat jam minimum; dan
2. Head minimum untuk menjangkau seluruh wilayah pelayanan, nilai ini didapat dari simulasi pada aplikasi Epanet pada saat VSD aktif.

Kedua pertimbangan di atas sejalan dengan yang dilakukan oleh Abdelsalam dan Gabbar (2021) dimana debit dan *head* minimum adalah dua hal yang wajib terpenuhi untuk mendistribusikan air ke pelanggan. Melalui kedua pertimbangan tersebut maka operasional VSD yang disarankan di Sistem Distribusi Summersari dapat dilihat pada Tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.5 Rencana Operasional VSD di Sistem Distribusi Summersari

Jam	Operasional VSD			
	Frekuensi (Hz)	Head (m)	Debit (lps)	Daya (P)
01:00	45	5.45	6.28	6.82
02:00	45	5.45	6.28	6.82
03:00	45	5.45	6.28	6.82
19:00	45	5.45	6.28	6.82
20:00	45	5.45	6.28	6.82
21:00	45	5.45	6.28	6.82
22:00	45	5.45	6.28	6.82
23:00	45	5.45	6.28	6.82
00:00	45	5.45	6.28	6.82

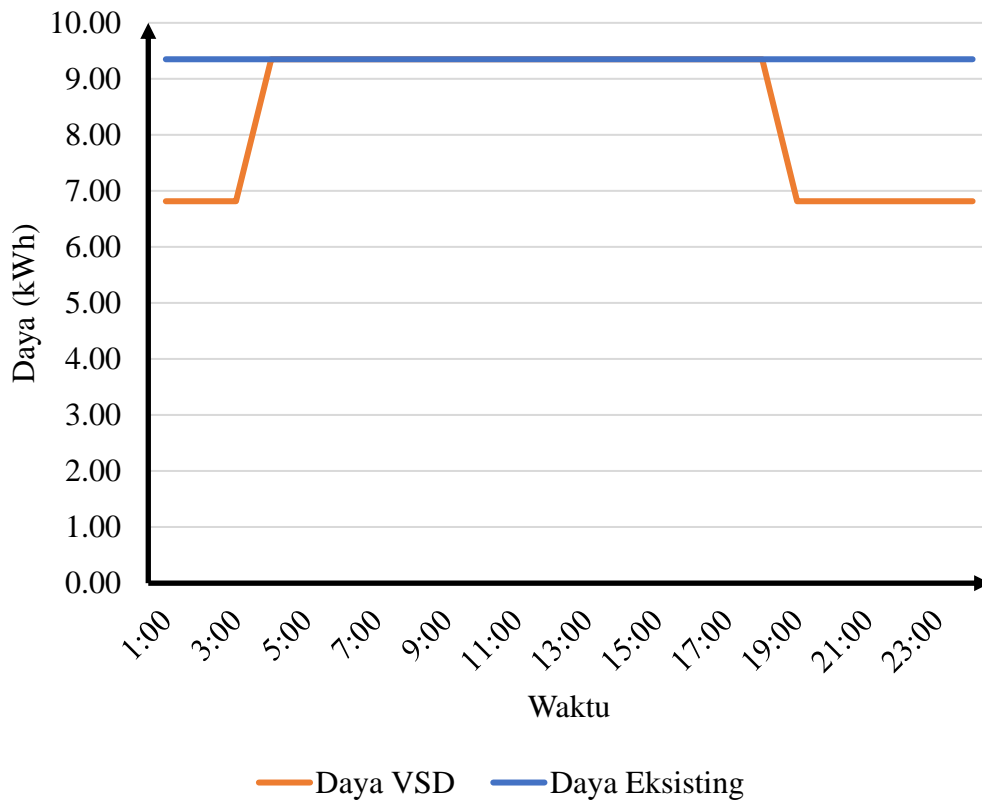
Sumber : Hasil perhitungan (2021)

Penggunaan VSD di Sistem Distribusi Summersari direncanakan mulai beroperasi pada pukul 19.00 sampai dengan pukul 03.00 setiap harinya sesuai dengan Tabel 4.5, dimana di luar jam tersebut pompa beroperasi normal (VSD tidak aktif), yaitu konstan pada frekuensi 50 Hz. Jam operasional yang ditentukan tersebut adalah waktu dimana pemakaian pelanggan berada pada jam-jam minimum pemakaian sehingga dapat dilakukan penurunan frekuensi kerja motor. Frekuensi yang disarankan dalam meningkatkan efisiensi operasional pompa adalah 45 Hz. Pemilihan frekuensi tersebut didasarkan pada perbandingan antara debit dan tekanan yang dibutuhkan pelanggan dengan debit dan tekanan yang disediakan oleh pompa (saat VSD aktif) dalam mengalirkan air.

4.3.3 Analisis Efisiensi Energi

A. Total Energi dan Tagihan Listrik

Penurunan frekuensi karena penggunaan VSD berdampak pada penurunan daya pompa seperti yang tertera Gambar 4.12. Daya yang berkurang akan meningkatkan efisiensi karena biaya listrik menjadi lebih murah. Peningkatan efisiensi tersebut adalah sebesar 10,16%. Nilai tersebut didapat dari penurunan kebutuhan daya pompa harian semula sebesar 9,35 kWh, berkurang menjadi 8,40 kWh. Penurunan daya sebesar 10,16% membuat Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang berpotensi dapat menghemat biaya tagihan listrik sebesar Rp 999.408 setiap bulannya.



Gambar 4.12 Pengurangan Daya di Sistem Eksisting dengan VSD

B. Specific Energy Consumption

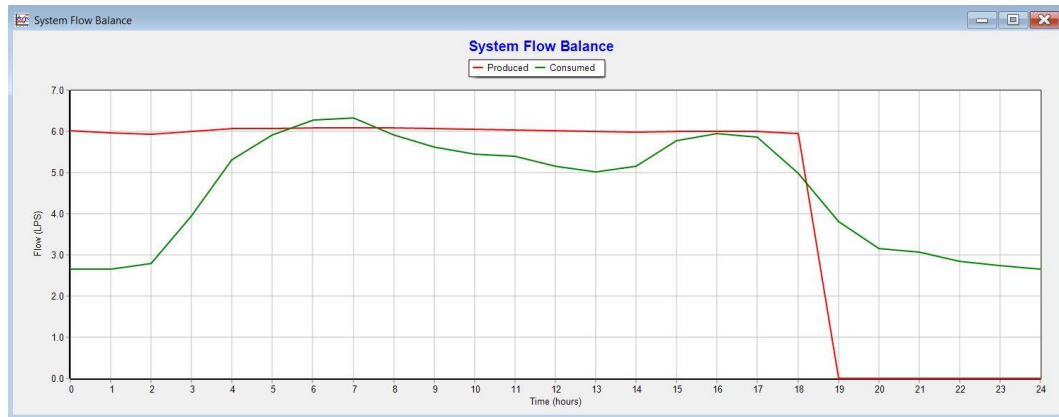
Pengukuran SEC dilakukan dengan membagi seluruh nilai energi yang terpakai dengan skema VSD (kWh) terhadap nilai produk atau volume produksi air (m^3) dalam waktu 1 bulan. Produksi air dan besaran energi listrik yang terpakai dengan skema pemasangan VSD masing-masing adalah sebesar $17.602 m^3$ /bulan dan $6115,02 kWh$ dalam 1 bulan. Berdasarkan kedua angka tersebut maka didapatkan nilai SEC sebesar $0,35 kWh/m^3$. Nilai SEC tersebut meningkat dibandingkan dengan sistem eksisting tanpa menggunakan VSD ($SEC = 0,38 kWh/m^3$).

4.4 Analisis Teknis dan Kelayakan Finansial

4.4.1 Analisis Jaringan Pipa dengan *Elevated Reservoir*

Hasil simulasi jaringan perpipaan dengan skema *Elevated Reservoir* pada Sistem Distribusi Summersari menunjukkan adanya perubahan dibandingkan skema eksisting. Perubahan tersebut adalah tercapainya debit air stabil yang diproduksi oleh pompa, seperti yang tertera pada Gambar 4.13. Besaran debit air yang diproduksi oleh pompa tersebut stabil sebesar 6 liter/detik. Berdasarkan gambar

tersebut, telah terjadi perubahan signifikan dari sisi debit produksi, semula berfluktuasi berdasarkan pemakaian pelanggan berubah menjadi debit produksi yang stabil.



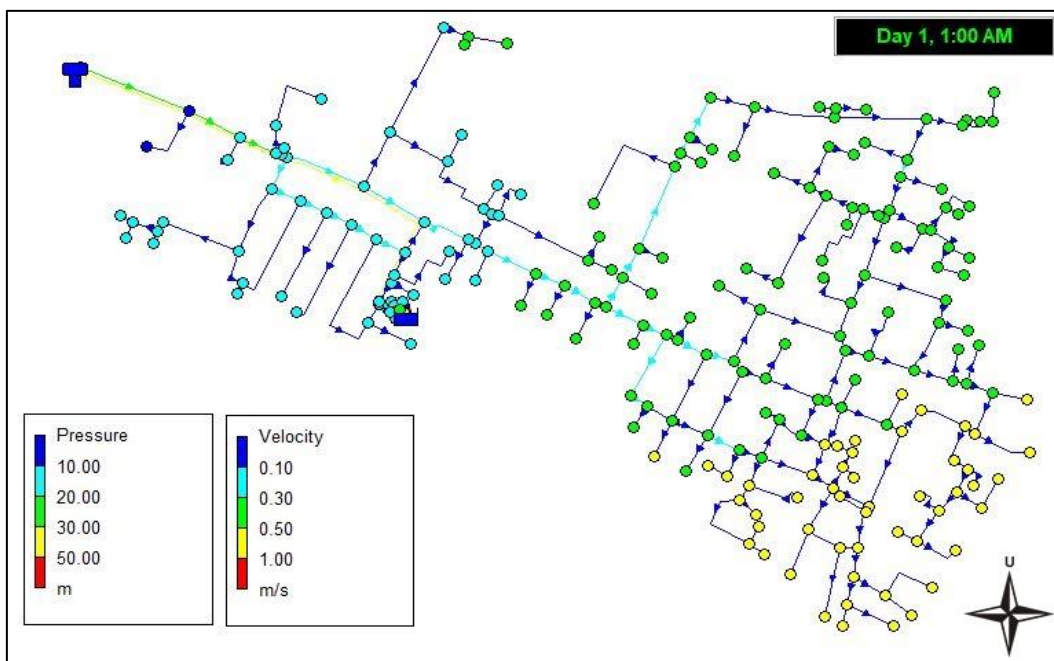
Gambar 4.13 Sistem Aliran dengan Skema *Elevated Reservoir*

Selain terkait debit produksi, berdasarkan gambar di atas perubahan lain di Sistem Distribusi Sumpersari berupa perubahan sistem aliran. Perubahan tersebut semula seluruhnya pemompaan menjadi kombinasi pemompaan dan gravitasi. Ketika pompa beroperasi (pukul 00:00 – 18:00) maka sistem jaringan mengalirkan air dengan pemompaan. Selama periode ini, tidak seluruh air yang diproduksi pompa terpakai oleh pelanggan terutama pada jam minimum. Sisa dari debit air produksi yang tidak terpakai tersebut menjadi *surplus* produksi yang mengalir mengisi reservoir. Setelah itu, tepat dipukul 18:00 pompa berhenti beroperasi yang bertepatan dengan sudah terpenuhinya kebutuhan pemakaian pelanggan. Saat memasuki periode pompa berhenti beroperasi (18:00-00:00) maka sistem aliran air berubah menjadi sistem gravitasi yang berasal dari reservoir.

Terdapat perbedaan periode waktu operasional pompa pada simulasi Epanet 2.0 pada Gambar 4.13 dan hasil perhitungan volume reservoir pada Tabel 4.2. Hal ini disebabkan keterbatasan *control program* yang tersedia di aplikasi Epanet 2.0, yaitu tidak bisa mematikan pompa saat simulasi dimulai (pukul 00:00). Oleh karena itu sebagai pengganti maka pompa dimatikan lebih cepat, yaitu pada pukul 18:00 dimana pada hasil perhitungan volume reservoir, pompa dijadwalkan mulai berhenti beroperasi pada pukul 19:00.

Kriteria untuk menilai jaringan pipa dengan skema reservoir juga menggunakan *pressure* dan kecepatan. Hasil simulasi dengan Epanet 2.0 menunjukkan kriteria *pressure* minimal 0,75 bar (7,5 meter) terpenuhi selama periode 24 jam, baik di jam minimum dan maksimum. Namun sama halnya dengan sistem ekisting, kriteria kecepatan minimal 0,3 meter/detik tidak terpenuhi. Adapun hasil simulasi jaringan pada jam minimum dan maksimum adalah sebagai berikut:

A. Jaringan Pipa dengan *Elevated Reservoir* (Jam Minimum)

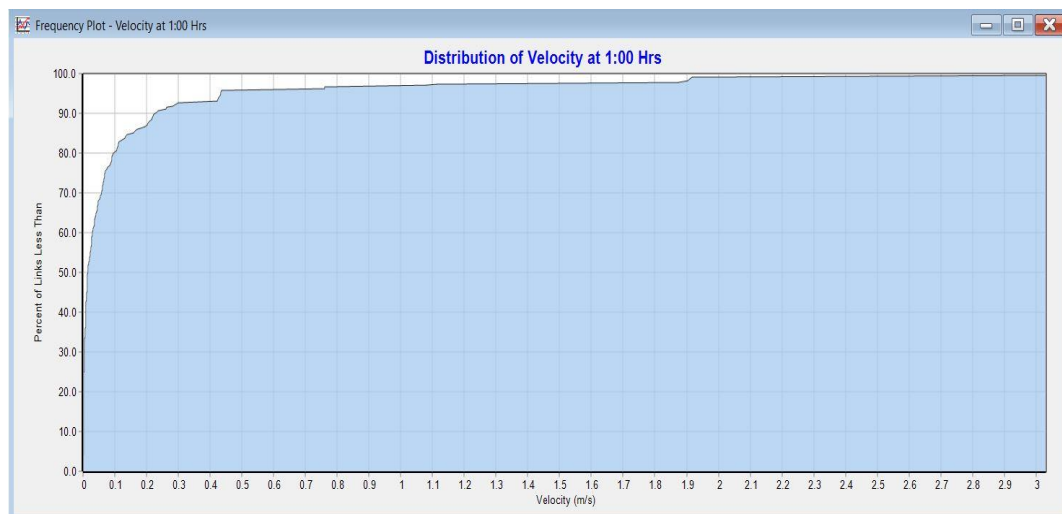


Gambar 4.14 Hasil Simulasi Jaringan dengan *Elevated Reservoir* pada Jam Minimum

Berkaitan dengan kriteria *pressure*, hasil simulasi jaringan pipa jam minimum dengan skema *Elevated Reservoir* di aplikasi Epanet 2.0 menunjukkan bahwa terjadi penurunan dari sistem eksisting. Menurut Sánchez dkk., (2020) penurunan tekanan akan mengurangi tingkat kebocoran pada jaringan pipa. Penurunan *pressure* yang terjadi masih dalam *range* batas minimum yang ditetapkan pada standar mutu pelayanan, yaitu minimal 0,75 bar (7,5 meter). Penurunan *pressure* di Sistem Distribusi Summersari adalah sebagai berikut:

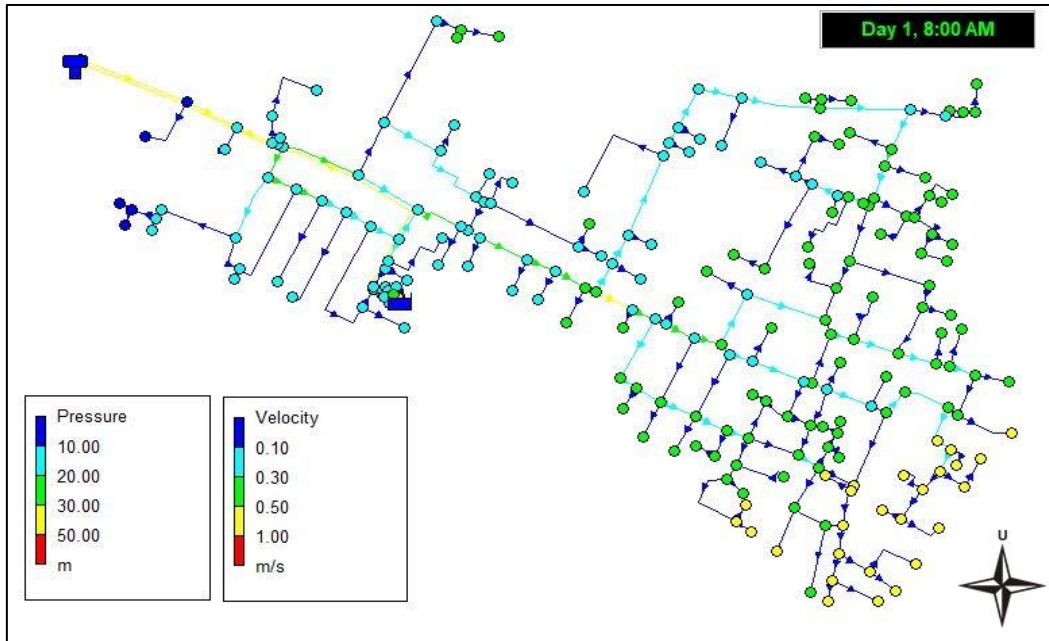
1. Wilayah dengan *pressure* di atas 50 meter (warna merah) pada skema eksisting, berubah menjadi *pressure* bernilai 30-50 meter (warna kuning);
2. Wilayah dengan *pressure* bernilai 30-50 meter (warna kuning) pada skema eksisting, berubah menjadi *pressure* bernilai 20-30 meter (warna hijau); dan
3. Wilayah dengan *pressure* bernilai 20-30 meter (warna hijau) pada skema eksisting, berubah menjadi *pressure* bernilai 10-20 meter (warna biru muda).

Berbeda halnya dengan kriteria kecepatan, hasil simulasi jaringan pipa dengan skema *Elevated Reservoir* di aplikasi Epanet 2.0 menunjukkan bahwa kriteria ini cenderung tetap. Pada saat jam minimum di jaringan pipa dengan penambahan *Elevated Reservoir*, sebanyak 92% jaringan pipa tidak memenuhi kriteria maksimum 0,3 meter/detik yang ditunjukkan Gambar 4.15. Nilai kecepatan yang kecil disebabkan oleh pemasangan diameter pipa yang besar untuk mengantisipasi kebutuhan pertumbuhan pelanggan.



Gambar 4.15 Grafik *Frequency Plot* Kecepatan Aliran pada Jam Minimum Skema *Elevated Reservoir*

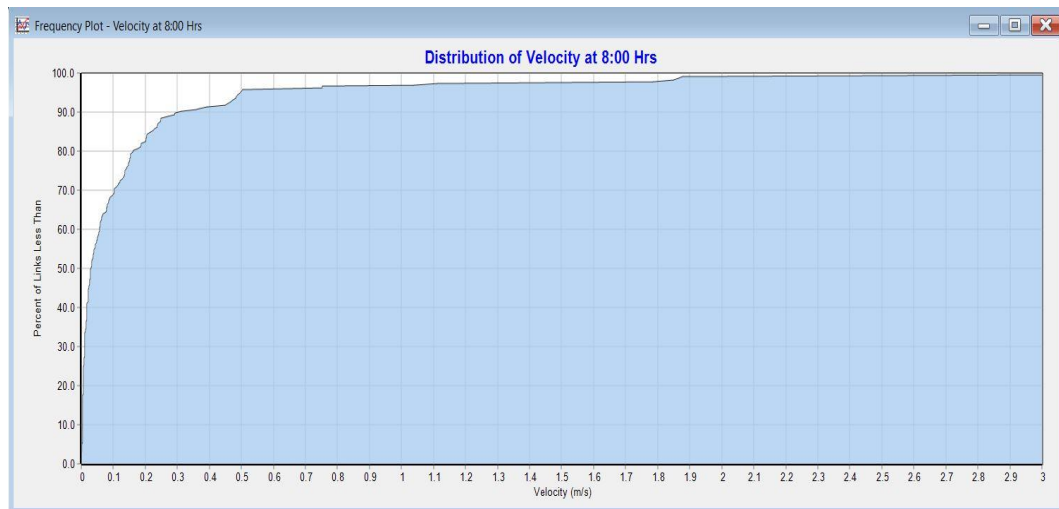
A. Jaringan Pipa dengan *Elevated Reservoir* (Jam Maksimum)



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Jaringan dengan *Elevated Reservoir* pada Jam Maksimum

Berkaitan dengan kriteria *pressure*, hasil simulasi jaringan pipa jam maksimum dengan skema *Elevated Reservoir* di aplikasi Epanet 2.0, menunjukkan bahwa tekanan cenderung sama dengan sistem eksisting. Dimana hanya sebagian kecil node yang mengalami penurunan *pressure*. Kriteria *pressure* yang cenderung tetap tersebut terjadi karena kondisi aliran hampir sama dengan kondisi eksisting, yaitu tidak ada perbedaan yang cukup signifikan pada debit produksi dan debit pemakaian pelanggan. *Pressure* pada jam maksimum masih dalam batas minimal yang ditetapkan pada standar mutu pelayanan, yaitu minimal 0,75 bar (7,5 meter).

Berkaitan dengan kriteria kecepatan, hasil simulasi jaringan pipa pada jam maksimum dengan skema *Elevated Reservoir* di aplikasi Epanet 2.0 menunjukkan bahwa kriteria ini cenderung tetap. Pada saat jam maksimum di jaringan pipa dengan penambahan *Elevated Reservoir*, sebanyak 90% jaringan pipa tidak memenuhi kriteria minimum 0,3 meter/detik.



Gambar 4.17 Grafik *Frequency Plot* Kecepatan Aliran pada Jam Maksimum Skema *Elevated Reservoir*

Gambar 4.17 di atas adalah grafik *frequency plot* yang didapat dari simulasi Epanet 2.0. Gambar tersebut menunjukkan bahwa di jam maksimum, sebanyak 92% jaringan pipa memiliki kecepatan di bawah 0,3 meter/detik. Jika dibandingkan hasil *frequency plot* parameter kecepatan pada jam maksimum dan jam minimum pada skema *Elevated Reservoir*, kriteria kecepatan tersebut tidak memiliki perbedaan. Hal ini terjadi karena debit aliran cenderung tetap, yaitu jam minimum debit air *demand* pemakaian pelanggan kecil namun pompa harus bekerja mengisi reservoir dan pada saat jam minimum pemakaian air tinggi berdasarkan *demand pattern*.

4.4.2 Analisis Finansial Pembangunan *Elevated Reservoir*

Perkiraan kebutuhan biaya untuk investasi untuk pembangunan *Elevated Reservoir* adalah sebesar Rp 958.681.946,89 sesuai dengan Tabel 4.6. Nilai investasi ini akan diambil dari kas internal Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. Investasi yang akan dilakukan sangat memungkinkan dikarenakan kondisi kelembagaan dalam kategori sehat. Adapun mengacu pada data BPPSPAM (2019), Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang memiliki laba bersih sebesar Rp 42.927.351.000, sehingga investasi pembangunan *Elevated Reservoir* menghabiskan biaya sebesar 2,23% dari laba bersih tersebut.

Tabel 4.6 Perkiraan Biaya Pembangunan *Elevated Reservoir*

No	Pekerjaan	Harga	Jumlah	Total Harga
1	Reservoir			
	Pekerjaan Reservoir kapasitas 129 m ³ dengan elevasi 7 meter	Rp 869,956,946.89	1 paket	Rp 869,956,946.89
2	Pekerjaan Perpipaan			
	Pengadaan dan pemasangan pipa transmisi diameter 100 mm	Rp 175,000.00	507 m	Rp 88,725,000.00
Total Biaya				Rp 958,681,946.89

Sumber : Hasil Perhitungan (2021)

Analisis finansial dilakukan untuk mengetahui apakah pembangunan *Elevated Reservoir* di Sistem Distribusi Summersari layak atau tidak untuk dilaksanakan.

Analisis yang dilakukan didasarkan pada beberapa pertimbangan sebagai berikut:

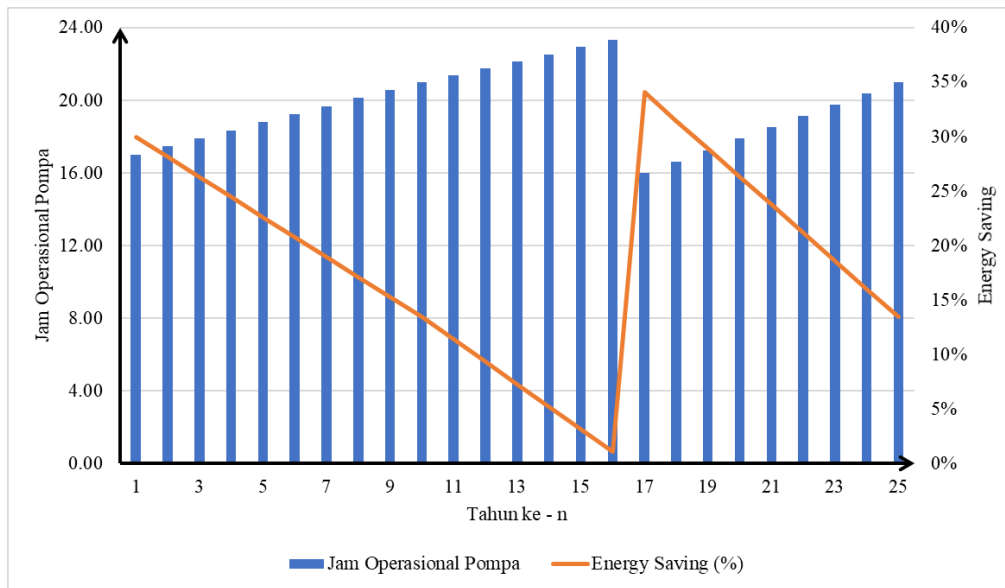
1. Umur pakai *Elevated Reservoir* adalah 25 tahun;
2. Perhitungan *discount factor* menggunakan bunga rata-rata Bank Indonesia 5 tahunan sebesar 5,9%;
3. Komponen arus kas masuk adalah besaran nilai uang dari *energy saving* dijumlahkan dengan potensi penambahan SR dari sistem eksisting. Perhitungan nilai uang *energy saving* didapat dari perkalian tarif listrik dan besaran penurunan energi listrik (kWh) yang dicapai sedangkan potensi penambahan SR adalah jumlah SR karena penurunan kebocoran sebesar 761 SR dengan perhitungan pada Lampiran C. Namun dalam perhitungan arus kas masuk, penambahan SR mengikuti proyeksi kenaikan pelanggan yaitu 2,5% sehingga selama 25 tahun masa pakai, SR yang bertambah adalah 691 SR. Potensi pemasukan dari penambahan SR dapat dilihat pada Tabel 4.7 sebagai berikut:

Tabel 4.7 Potensi Pemasukan dari Penambahan SR, Tarif dan Harga Pokok Produksi (HPP) Selama Umur Pakai *Elevated Reservoir*

Tahun ke-	Potensi Penambahan SR	Tarif (Rp/m ³)	HPP (Rp/m ³)	Potensi Pemasukan (Rp)
1	0	5768	4018	-
2	21	5883	4055	6,852,197
3	43	6001	4093	14,482,590
4	66	6121	4131	22,941,403
5	89	6243	4170	32,281,574
6	112	6368	4208	42,558,893
7	137	6496	4247	53,832,148
8	161	6626	4287	66,163,270
9	187	6758	4327	79,617,493
10	213	6893	4367	94,263,518
11	239	7031	4408	110,173,685
12	267	7172	4449	127,424,156
13	295	7315	4490	146,095,102
14	324	7462	4532	166,270,903
15	353	7611	4574	188,040,357
16	383	7763	4617	211,496,897
17	414	7918	4659	236,738,819
18	446	8077	4703	263,869,525
19	479	8238	4747	292,997,771
20	512	8403	4791	324,237,933
21	546	8571	4835	357,710,279
22	581	8742	4880	393,541,262
23	617	8917	4926	431,863,821
24	654	9096	4971	472,817,698
25	691	9277	5018	516,549,771

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

- Berkaitan dengan *energy saving* dengan skema *Elevated Reservoir*, Gambar 4.18 menunjukkan bahwa *Energy Saving* yang didapat setiap tahunnya mengalami penurunan karena jam operasional pompa perlu ditambah seiring dengan pertumbuhan pelanggan pada sistem ini. Pertumbuhan pelanggan tersebut mengakibatkan *energy saving* tidak dapat tercapai pada tahun ke-16 sehingga diperlukan penggantian pompa baru di tahun ke-17.



Gambar 4.18 Pengaruh Pertumbuhan Pelanggan terhadap Jam Operasional Pompa dan *Energy Saving*

5. Komponen arus kas keluar adalah besaran nilai biaya operasional, yaitu nilai HPP dikali dengan potensi penambahan SR. Adapun biaya investasi dikeluarkan pada arus kas keluar di tahun pertama. Selain itu berdasarkan Gambar 4.18, diperlukan penggantian pompa di tahun ke-17 untuk menyesuaikan kebutuhan air akibat dari pertumbuhan pelanggan;
6. Tarif air minum akan naik sebesar 2% per tahun, nilai tersebut adalah setengah dari kenaikan rata-rata dalam 5 tahun ke belakang (4%);
7. Nilai HPP akan naik sebesar 0,93% per tahun, nilai tersebut adalah setengah dari kenaikan rata-rata dalam 5 tahun ke belakang (1.87%);
8. Jumlah pelanggan akan mengalami kenaikan sebesar 2,5% per tahun, nilai tersebut adalah setengah dari kenaikan rata-rata dalam 5 tahun ke belakang (5%); dan
9. Analisis finansial tidak memperhitungkan kebutuhan pembiayaan untuk penggantian apabila terjadi kerusakan pada infrastruktur air minum selama umur pakai.

Dengan beberapa pertimbangan di atas maka didapatkan arus kas masuk, arus kas keluar dan laba bersih dari skema *Elevated Reservoir* seperti pada Tabel 4.8 berikut:

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Arus Kas Masuk, Arus Kas Keluar dan Laba Bersih Pembangunan *Elevated Reservoir*

Tahun ke-	Arus Kas Masuk (Rp)	Arus Kas Keluar (Rp)	Laba Bersih (Rp)	Laba Bersih PV (Rp)
1	-	958,681,947	(958,681,947)	(905,270,960)
2	57,766,455	15,201,470	42,564,984	37,954,263
3	79,079,352	31,069,259	48,010,093	40,424,501
4	101,911,311	47,627,691	54,283,620	43,160,350
5	126,340,448	64,901,943	61,438,505	46,127,598
6	152,448,611	82,918,072	69,530,540	49,294,656
7	180,321,558	101,703,049	78,618,509	52,632,389
8	210,049,136	121,284,790	88,764,346	56,113,954
9	241,725,469	141,692,186	100,033,283	59,714,649
10	275,449,160	162,955,138	112,494,022	63,411,766
11	311,323,497	185,104,593	126,218,905	67,184,462
12	349,183,511	208,172,581	141,010,930	70,876,335
13	389,415,679	232,192,250	157,223,430	74,622,498
14	432,138,690	257,197,905	174,940,785	78,405,699
15	477,476,846	283,225,053	194,251,793	82,210,187
16	525,560,321	310,310,435	215,249,886	86,021,611
17	576,525,441	438,492,079	138,033,363	52,089,807
18	672,308,542	367,809,338	304,499,204	108,507,281
19	727,013,494	398,302,938	328,710,556	110,608,986
20	785,048,850	430,015,026	355,033,823	112,810,761
21	846,578,494	462,989,219	383,589,275	115,093,632
22	915,707,534	497,270,652	418,436,881	118,554,716
23	989,665,477	532,906,037	456,759,440	122,202,601
24	1,067,657,027	569,943,709	497,713,317	125,740,800
25	1,149,879,082	608,433,692	541,445,390	129,168,215

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

Berdasarkan tabel di atas dapat dihitung rasio-rasio pada analisis finansial. Rasio yang digunakan adalah *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internat Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PP). Hasil perhitungan terhadap rasio-rasio tersebut maka dapat disimpulkan bahwa investasi pembangunan *elevtaed reservoir* sebesar Rp 958.681.946,89 di Sistem Distribusi Sumpersari belum dapat dikatakan layak untuk direalisasikan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. Hal ini ditunjukkan dengan adanya indikator IRR yang menunjukkan tidak layak. Adapun hasil perhitungan seluruh rasio analisis finansial disajikan pada Tabel 4.9 sebagai berikut:

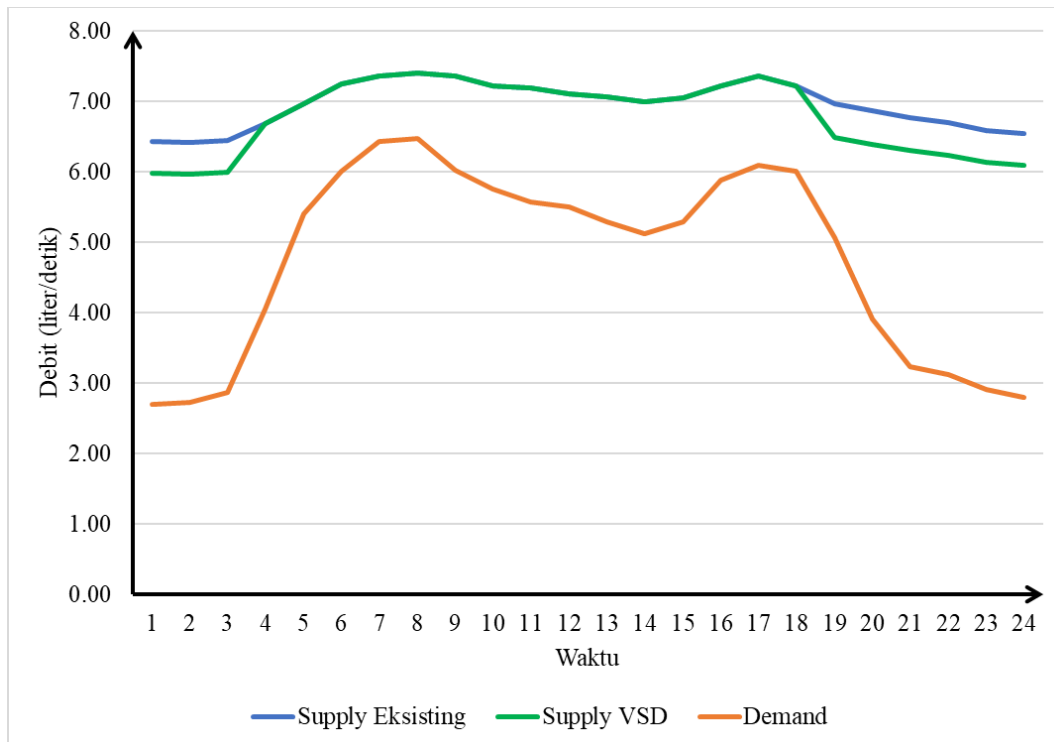
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan NPV, BCR, PP dan IRR Investasi Pemasangan *Elevated Reservoir*

Rasio	Nilai	Kriteria	Keterangan
NPV	Rp 997.650.753	$NPV > 0$	Layak
BCR	1,3	$BCR > 1$	Layak
PP	18 tahun	$PP < \text{Umur pakai}$	Layak
IRR	9,18%	$IRR > 11,75\%$	Tidak Layak

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

4.4.3 Analisis Jaringan Pipa dengan VSD

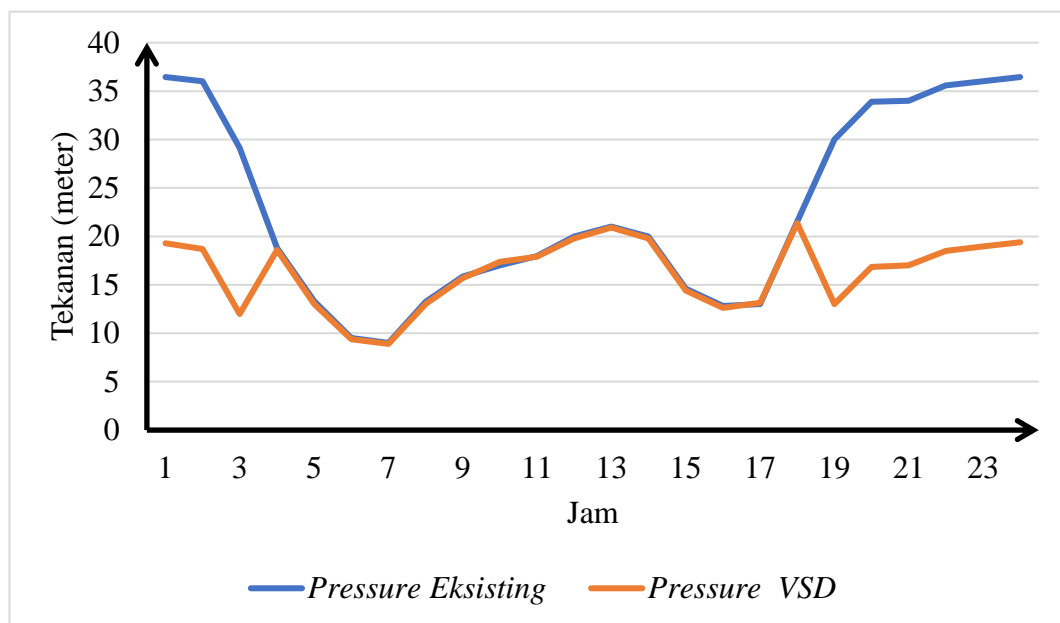
Hasil simulasi jaringan distribusi eksisting yang dipasang VSD tidak jauh berbeda dengan sistem eksisting. Gambar 4.19 menunjukkan bahwa debit operasional pompa yang dipasang VSD (garis hijau) mengalami penurunan saat VSD tersebut aktif yaitu pada pukul 00:00-03:00 dan 19:00-00:00. Adapun pada saat VSD tidak aktif jumlah air yang diproduksi sama halnya dengan sistem eksisting.



Gambar 4.19 Perbandingan Sistem Aliran Jaringan Pipa Eksisting dengan Pemasangan VSD

Secara umum hasil simulasi jaringan dengan periode 24 jam menunjukkan bahwa kinerja jaringan pipa dapat dikatakan baik dari kriteria *pressure* karena seluruh wilayah pelayanan memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan. Namun sama halnya dengan sistem eksisting, pada kriteria kecepatan tidak tercapai pada sebagian besar wilayah pelayanan karena menunjukkan nilai dibawah batas minimum yang dipersyaratkan.

Berkaitan dengan kriteria *pressure*, pemasangan VSD berdampak pada penurunan *pressure* di seluruh lingkup pelayanan. Penurunan *pressure* terjadi karena saat VSD aktif di jam minimum, pompa beroperasi pada kecepatan putar yang lebih rendah. Gambaran terkait penurunan *pressure* yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.20, dimana pada saat jam operasional VSD aktif (00:00-03:00 dan 19:00-00:00) terjadi penurunan *pressure* sedangkan pada saat VSD tidak beroperasi maka *pressure* cenderung sama dengan sistem eksisting.



Gambar 4.20 Perbandingan Tekanan di Titik Pelayanan Terjauh Sistem Eksisting dan Pemasangan VSD

4.4.4 Analisis Finansial Pemasangan VSD

Perkiraan kebutuhan biaya untuk investasi untuk pengadaan VSD adalah sebesar Rp 33.892.400 sesuai dengan Tabel 4.10. Secara visual, gambaran VSD yang akan dipasang sesuai daengan Gambar 4.21. Strategi pendanaan yang digunakan sama halnya dengan investasi pada pembangunan *Elevated Reservoir*

dimana besaran investasi ini akan diambil dari kas internal Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. Investasi VSD sangat memungkinkan dikarenakan kondisi kelembagaan dalam kategori sehat. Adapun investasi skema VSD terbilang sangat memungkinkan untuk terealisasi karena hanya menghabiskan biaya sebesar 0,08% dari laba bersih Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang.

Tabel 4.10 Perkiraan Biaya Pengadaan dan Pemasangan VSD

No	Pekerjaan	Harga	Jumlah	Total Harga
1	Pengadaan VSD (Paket)			
	Schneider <i>Variable Speed Drive</i> IP21 15KW 400v/480v ATV630D15N4	Rp 30,892,400.00	1 paket	Rp 30,892,400.00
2	Pemasangan VSD			
	Jasa Instalasi	Rp 3,000,000.00	1 paket	Rp 3,000,000.00
	Total Biaya			Rp 33,892,400.00



Gambar 4.21 *Variable Speed Drive* Merk Schneider 15 kWh

Analisis finansial dilakukan untuk mengetahui apakah pengadaan dan pemasangan VSD di Sistem Distribusi Summersari layak atau tidak untuk dilaksanakan. Analisis yang dilakukan juga didasarkan pada berbagai pertimbangan sebagai berikut:

1. Umur pakai VSD adalah 15 tahun;
2. Perhitungan *discount factor* menggunakan bunga Bank Indonesia rata-rata 5 tahunan sebesar 5,9%;

3. Komponen arus kas masuk adalah besaran nilai uang dari efisiensi dijumlahkan dengan potensi pemasukan dari penambahan SR dari sistem eksisting;
4. Perhitungan nilai uang *energy saving* dihitung dari perkalian tarif listrik dan besaran penurunan energi listrik (kWh) yang dapat dicapai yaitu sebesar Rp 11.992.900/ tahun. Adapun potensi pemasukan dari penambahan SR adalah sebesar total 572 SR yang didapat dari analisis air yang dapat diselamatkan dari kebocoran karena penurunan tekanan (Lampiran C). Namun dalam perhitungan arus kas masuk, penambahan SR mengikuti proyeksi kenaikan pelanggan yaitu 2,5% sehingga selama 15 tahun masa pakai, SR yang bertambah adalah 353 SR. Potensi pemasukan dari penambahan SR dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut:

Tabel 4.11 Potensi Pemasukan dari Penambahan SR, Tarif dan Harga Pokok Produksi (HPP) Selama Umur Pakai VSD

Tahun ke-	Potensi Penambahan SR	Tarif (Rp/m ³)	HPP (Rp/m ³)	Potensi Pemasukan (Rp)
1	0	5768	4018	-
2	21	5883	4055	6,852,197
3	43	6001	4093	14,482,590
4	66	6121	4131	22,941,403
5	89	6243	4170	32,281,574
6	112	6368	4208	42,558,893
7	137	6496	4247	53,832,148
8	161	6626	4287	66,163,270
9	187	6758	4327	79,617,493
10	213	6893	4367	94,263,518
11	239	7031	4408	110,173,685
12	267	7172	4449	127,424,156
13	295	7315	4490	146,095,102
14	324	7462	4532	166,270,903
15	353	7611	4574	188,040,357

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

5. Komponen arus kas keluar adalah besaran nilai biaya operasional, yaitu nilai HPP dikali dengan potensi penambahan SR. Adapun biaya investasi dikeluarkan pada arus kas keluar di tahun pertama;
6. Tarif air minum akan naik sebesar 2% per tahun, nilai tersebut adalah setengah dari kenaikan rata-rata dalam 5 tahun ke belakang (4%);

7. Nilai HPP akan naik sebesar 0,93% per tahun, nilai tersebut adalah setengah dari kenaikan rata-rata dalam 5 tahun ke belakang (1.87%);
8. Analisis finansial tidak memperhitungkan kebutuhan pembiayaan untuk penggantian apabila terjadi kerusakan pada infrastruktur air minum selama umur pakai.

Dengan pertimbangan di atas maka didapatkan arus kas masuk, arus kas keluar dan laba bersih dari skema pemasangan VSD seperti pada Tabel 4.12 sebagai berikut:

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Arus Kas Masuk, Arus Kas Keluar dan Laba Bersih Pengadaan dan Pemasangan VSD

Tahun ke-	Arus Kas Masuk (Rp)	Arus Kas Keluar (Rp)	Laba Bersih (Rp)	Laba Bersih PV (Rp)
1	11,992,900	33,892,400	(21,899,500)	(21,899,500)
2	34,046,567	15,201,470	18,845,096	16,803,759
3	57,544,749	31,069,259	26,475,490	22,292,364
4	82,561,994	47,627,691	34,934,303	27,775,906
5	109,176,416	64,901,943	44,274,473	33,240,964
6	137,469,865	82,918,072	54,551,793	38,675,262
7	167,528,097	101,703,049	65,825,048	44,067,606
8	199,440,960	121,284,790	78,156,170	49,407,808
9	233,302,578	141,692,186	91,610,392	54,686,623
10	269,211,555	162,955,138	106,256,417	59,895,689
11	307,271,178	185,104,593	122,166,585	65,027,472
12	347,589,637	208,172,581	139,417,056	70,075,206
13	390,280,251	232,192,250	158,088,002	75,032,848
14	435,461,708	257,197,905	178,263,803	79,895,023
15	483,258,309	283,225,053	200,033,257	84,656,986

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

Berdasarkan Tabel 4.12 di atas, laba bersih hanya bernilai negatif pada tahun pertama. Pada tahun tersebut arus keluar terbesar berasal dari investasi awal pengadaan VSD. Nilai arus kas dan keluar yang tertera kemudian digunakan untuk menghitung rasio-rasio pada analisis kelayakan finansial. Rasio yang digunakan adalah *Net Present Value (NPV)*, *Benefit Cost Ratio (BCR)*, *Internat Rate of Return (IRR)*, dan *Payback Period (PP)*. Hasil perhitungan terhadap rasio-rasio tersebut maka dapat disimpulkan bahwa investasi pengadaan dan pemasangan VSD sebesar

Rp 33.892.400 di Sistem Distribusi Summersari layak untuk direalisasikan oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. Hal ini ditunjukkan dengan kesimpulan layak pada seluruh rasio analisis finansial sesuai dengan Tabel 4.13 sebagai berikut:

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan NPV, BCR, PP dan IRR Investasi Pemasangan VSD

Rasio	Nilai	Kriteria	Keterangan
NPV	Rp 699.643.016	NPV > 0	Layak
BCR	1,64	BCR > 1	Layak
PP	4 tahun	PP < Umur pakai	Layak
IRR	72,18%	IRR > 11,75%	Layak

Sumber : Hasil perhitungan (2021)

4.5 Perbandingan Skema *Elevated Reservoir* dan VSD

Berdasarkan analisis teknis dan finansial terhadap pembangunan *Elevated Reservoir* dan pemasangan VSD di Sistem Distribusi Summersari maka didapatkan hasil sesuai dengan Tabel 4.14. Berdasarkan kedua analisis yang dilakukan maka dapat disarankan skema pemasangan VSD di Sistem Distribusi Summersari, dimana analisis teknis dan finansial seluruhnya menunjukkan hasil layak.

Tabel 4.14 Perbandingan Hasil Analisis Teknis dan Finansial Pembangunan *Elevated Reservoir* dan Pemasangan VSD

Skema	<i>Elevated Reservoir</i>	<i>Variable Speed Drive</i>
Biaya Investasi	Rp 958.681.946,89	Rp 33.892.400
Energy Saving / bulan	Rp 2,976,065.63	Rp 994,408.30
Spesific Energy Consumption	0,37 kWh/m ³ (meningkat dari sistem eksisting)	0,35 kWh/m ³ (meningkat dari sistem eksisting)
Analisis Teknis	Pressure	Memenuhi 0,75 bar (7,5 meter) di pelanggan terjauh
	Kecepatan	Sebagian tidak terpenuhi minimum 0,3 meter/detik. Kriteria ini masih dapat dikatakan layak karena disebabkan oleh penggunaan diameter pipa yang besar untuk proyeksi pertumbuhan pelanggan.

Skema		<i>Elevated Reservoir</i>	<i>Variable Speed Drive</i>
Analisis Finansial	NPV	Rp 997.660.753 (NPV bernilai positif sehingga dikatakan layak)	Rp 699.634.016 (NPV bernilai positif sehingga dikatakan layak)
	BCR	1,3 (<i>benefit</i> lebih besar dibandingkan <i>cost</i> , layak)	1,64 (<i>benefit</i> lebih besar dibandingkan <i>cost</i> , layak)
	PP	18 tahun (PP terpenuhi sebelum umur pakai habis, layak)	4 tahun (PP terpenuhi sebelum umur pakai habis, layak)
	IRR	9,18% (<i>return</i> yang diharapkan adalah 11,75% sehingga tidak layak)	72,18% (<i>return</i> yang diharapkan adalah 11,75% sehingga tidak layak)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian pada hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa butir sebagai berikut:

1. Total pemakaian energi listrik di Sistem Distribusi Summersari eksisting adalah 6881,47 kW/bulan sehingga tagihan listrik yang dibayarkan Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang adalah sebesar Rp 9.941.662 setiap bulannya. Volume produksi rata-rata adalah 18.071 m³/bulan sehingga nilai SEC adalah sebesar 0,38 kWh/m³;
2. Hasil perencanaan *Elevated Reservoir* dengan metode tabulasi didapatkan volume reservoir adalah 129 m³ dengan ketinggian 7 m. Peningkatan efisiensi energi dengan skema pembangunan *Elevated Reservoir* berpengaruh pada penurunan jam operasional pompa semula 24 jam menjadi 17 jam sehingga menurunkan pemakaian daya listrik. Perubahan tersebut berpeluang menghemat tagihan listrik sebesar Rp 2.976.000 per bulan atau turun sebanyak 29,94%. Adapun nilai SEC adalah 0,37 kWh/m³ (meningkat dari sistem eksisting);
3. Hasil perencanaan VSD dengan membandingkan kebutuhan debit dan tekanan eksisting maka VSD dapat beroperasi pada pukul 19.00 sampai dengan 03.00 setiap harinya dengan frekuensi kerja 45 Hz. Peningkatan efisiensi energi dengan skema VSD berpengaruh pada penurunan frekuensi kerja pompa semula 50 Hz selama 24 jam menjadi 45 Hz pada saat VSD beroperasi. Operasional VSD tersebut menurunkan pemakaian daya harian pompa. Penurunan daya itu berpeluang menghemat tagihan listrik sebesar Rp 990.408,30 per bulan atau turun sebanyak 10,16%. Adapun nilai SEC adalah 0,35 kWh/m³ (meningkat dari sistem eksisting); dan

4. Hasil analisis teknis dan finansial menunjukkan bahwa skema pemasangan VSD lebih dapat direkomendasikan dibandingkan skema pembangunan *Elevated Reservoir*. Hal ini ditunjukkan dari hasil analisis teknis dan finansial, yang menunjukkan seluruhnya layak sehingga dapat diterapkan di Sistem Distribusi Sumpersari.

5.2 Saran

Berdasarkan uraian pada hasil dan pembahasan, dapat diberikan rekomendasi sebagai berikut :

1. Untuk memastikan operasional VSD sesuai dengan debit dan tekanan yang dibutuhkan pelanggan, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait bagaimana sistem kontrol operasional dari perangkat VSD; dan
2. Dalam penelitian ini, analisis finansial masih dilakukan secara sederhana sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan asumsi-asumsi penggantian, perbaikan atau kebutuhan lainnya dalam perhitungan arus kas keluar selama masa pakai pada kedua skema, baik pembangunan *Elevated Reservoir* dan pemasangan VSD.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelsalam, A. A., & Gabbar, H. A. (2021). Energy-saving and management of water pumping networks. *Heliyon*, 7(8), e07820. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07820>
- Anindita, G., Setiawan, E., & Syahid, A. (2016). Optimasi Energi pada Motor Induksi 3 Fasa dalam Memproduksi Kebutuhan Air (Studi Kasus di PDAM Karang Pilang Surabaya). *Seminar Nasional Maritim, Sains Dan Teknologi Terapan*, 01(November), 87–94.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). Standar Nasional Indonesia (SNI) 7509:2011 tentang Tata Cara Perencanaan Teknik Jaringan Distribusi dan Unit Pelayanan Sistem Penyediaan Air Minum. *Standar Nasional Indonesia*, 28 hal.
- Balai Teknik Air Minum. (2019). *Modul Pelatihan Efisiensi Energi*. Kementerian PUPR.
- Bolognesi, A., Bragalli, C., Lenzi, C., & Artina, S. (2014). Energy efficiency optimization in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 70, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.021>
- BPMA, & Gambica. (2009). *Variable Speed Driven Pumps Guide*. BPMA: The Pump Industry Association.
- BPPSPAM. (2019). Buku Kinerja BUMD Penyelenggara SPAM. *Kementerian PUPR*.
- Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera, E., Soriano, J., & Espert, V. (2015). Energy Assessment of Pressurized Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), 04014095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000494](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000494)
- Cabrera, Enrique, Gómez, E., Espert, V., & Cabrera, E. (2017). Strategies to Improve the Energy Efficiency of Pressurized Water Systems. *Procedia Engineering*, 186, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.248>
- Copeland, C., & Carter, N. T. (2017). *Energy - Water Nexus : The Water Sector ' s Energy Use*.
- Doe. (2004). Variable Speed Pumping — A Guide to Successful Applications, Executive Summary is the result of a collaboration between the Hydraulic Institute, Europump, and the U.S. Department of Energy's (DOE) Industrial Technologies Program. *A Guide to Variable Speed Pumping*, 20.
- Fontana, N., Giugni, M., & Portolano, D. (2012). Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(3), 237–244. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000179](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000179)

- Haramain, M. Al, Effendi, R., & Irianto, F. (2017). Perancangan Sistem Memadam Kebakaran Pada Perkantoran dan Pabrik Label Makanan PT. XYZ dengan Luas Bangunan 1125 m². *Jurnal Mesin Teknologi*, 11(2), 129–150.
- Hashemi, S., Fillion, Y. R., & Speight, V. L. (2015). Pipe-level energy metrics for energy assessment in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 119(1), 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.864>
- Kementerian PUPR. (2014). *Pedoman Pelaksanaan Efisiensi Energi di PDAM*. 82.
- Kementerian PUPR. (2020). *Kajian-Kajian dalam Penyusunan Feasibility Study SPAM Regional*. Kementerian PUPR.
- Kusuma, I. (2020). Aplikasi VSD Inverter Dalam Penghematan Konversi Energi. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, 26(2), 25–32. <https://doi.org/10.37277/stch.v26i2.507>
- Kusumajati, B., Solichin, & Koosdayani. (2016). Analisis distribusi air pada sistem penyediaan air minum Kampus Universitas Sebelas Maret dengan Epanet. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 2(1), 806–813.
- Latchoomun, L., Ah King, R. T. F., Busawon, K. K., & Ginoux, J. M. (2020). Harmonic oscillator tank: A new method for leakage and energy reduction in a water distribution network with pressure driven demand. *Energy*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117657>
- Loganthurai, P., Parthasarathy, S., Selvakumaran, S., & Rajasekaran, V. (2012). Energy Conservation Measures in a Technical Institutional Building in Tamilnadu in India. *Energy Procedia*, 14, 931–936. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887>
- Moreira, D. F., & Ramos, H. M. (2013). Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study. *Journal of Energy*, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/620698>
- Muji, A., Dan, H., & Aziz, A. (2018). Evaluation of the Centrifugal Pump Efficiency at the Cilincing Distribution Water Treatment Unit. *Jurnal Energi Dan Lingkungan*, 14, 1–10.
- Mulyono, M. (2020). Implementasi Demand Side Management (DSM) Pada Instalasi Pengolahan Air PDAM Mulia Baru. *Energi & Kelistrikan*, 12(1), 43–52. <https://doi.org/10.33322/energi.v12i1.934>
- Predescu, A., Truică, C. O., Apostol, E. S., Mocanu, M., & Lupu, C. (2020). An advanced learning-based multiple model control supervisor for pumping stations in a smart water distribution system. *Mathematics*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/MATH8060887>
- Peraturan Pemerintah Nomor 122 Tahun 2015 Tentang Sistem Penyediaan Air Minum

- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat *Nomor 27 /PRT /M /2016* tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum
- Qasim, S. R., Motley, E. M., & Zhu, G. (2000). Water Works Engineering: Planning, Design, and Operation. In *New Dheli: Hall Inc* (p. 844). https://books.google.co.uk/books/about/Water_Works_Engineering.html?id=cAlSAAAAMAAJ&pgis=1
- Saksono, P. (2011). *Analisis Efisiensi Pompa Centrifugal pada Instalasi Pengolahan Air Kampung Damai Balikpapan*.
- Salomons, E., & Housh, M. (2020). Practical real-time optimization for energy efficient water distribution systems operation. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124148>
- Sánchez, A. S., Oliveira-Esquerre, K. P., dos Reis Nogueira, I. B., de Jong, P., & Filho, A. A. (2020). Water Loss Management Through Smart Water Systems. In *Modeling and Optimization in Science and Technologies* (Vol. 17, pp. 233–266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37794-6_12
- Smith, K., Liu, S., Liu, Y., Savic, D., Olsson, G., Chang, T., & Wu, X. (2016). Impact of urban water supply on energy use in China: a provincial and national comparison. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(8), 1213–1233. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9648-x>
- Stefanizzi, M., Capurso, T., Balacco, G., Binetti, M., Camporeale, S. M., & Torresi, M. (2020). Selection, control and techno-economic feasibility of Pumps as Turbines in Water Distribution Networks. *Renewable Energy*, 162, 1292–1306. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.108>
- Stoffel, B. (2015). The Role of Pumps for Energy Consumption and Energy Saving. *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units*, 1–24. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100597-2.00001-x>
- Sunela, M. (2017). *Real-Time Control Optimization of Water Distribution System with Storage*. <https://digi.lib.ttu.ee/i/?9007>
- Suparno. (2013). Optimisasi Penggunaan Energi Listrik Pada Unit Pengolahan Air Minum Selat Panjang. In *Jurnal ELKHA* (Vol. 5, Issue 1).
- Syahputra, R., Luqvi Budiarto, R., & Wilopo, W. (2018). Energy Saving Potency and Maintenance Costs Reduction in Water Treatment Plant (WTP) Pengok PDAM Tirtamarta Yogyakarta. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST 2018, 1*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528582>
- Tahani, M., Kandi, A., Moghimi, M., & Houreh, S. D. (2020). Rotational speed variation assessment of centrifugal pump-as-turbine as an energy utilization device under water distribution network condition. *Energy*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118502>

- Taini, I. P., & Purnomo, A. (2017). Studi Kehilangan Air Komersial (Studi Kasus: PDAM Kota Kendari Cabang Pohara). *Jurnal Teknik ITS*, 6(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25181>
- Tchobanoglous, G., Peavy, H. S., & Rowe, D. R. (1985). *Environmental Engineering* (Internatio). McGraw-Hill Book Company.
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020). Energy auditing and measurements in practice. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 89–146). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817247-6.00006-7>
- Vogeloesang, H. (2009). Two approaches to capacity control. *World Pumps*, 2009(511), 26–29. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(09\)70141-5](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(09)70141-5)
- Volk, M. (2013). Pump Characteristics and Applications. In *Pump Characteristics and Applications*. <https://doi.org/10.1201/b15559>
- Waspodo, W. (2017). Analisa Head Loss Sistem Jaringan Pipa Pada Sambungan Pipa Kombinasi Diameter Berbeda. *Suara Teknik: Jurnal Ilmiah*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.29406/stek.v8i1.534>
- Yoon, H., Sauri, D., & Amorós, A. M. R. (2018). Shifting scarcities? The energy intensity of water supply alternatives in the mass tourist resort of Benidorm, Spain. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su10030824>
- Yuhendri, M., Aswardi, A., & Hambali, H. (2020). Implementasi Pompa Air Otomatis Tenaga Surya Untuk Rumah Ibadah. *JIPEMAS: Jurnal Inovasi Hasil Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 166. <https://doi.org/10.33474/jipemas.v3i2.6758>

LAMPIRAN

Lampiran A

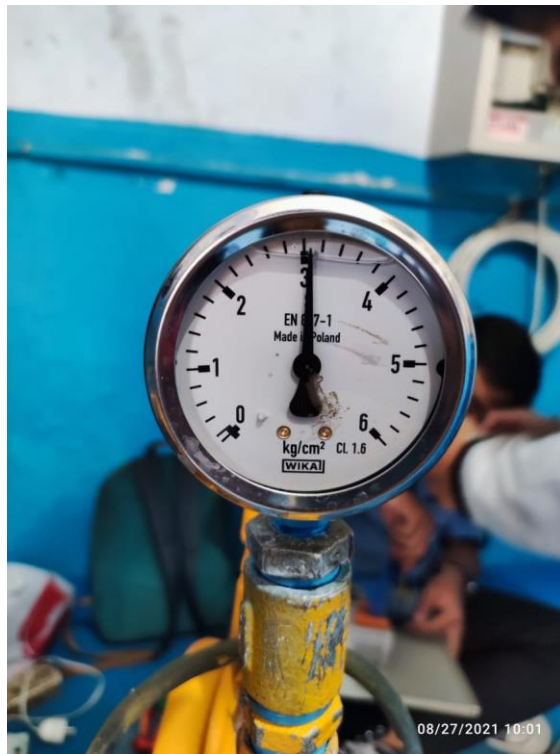
Dokumentasi Penelitian



Lokasi Pompa Sistem Distribusi Summersari



Pengambilan Data Kelistrikan Pompa



Pengukuran Data *Pressure* di Lokasi Penelitian



Pengukuran Data *Pressure* Tampilan SCADA di Lokasi Penelitian

Lampiran B

Perhitungan Total Head yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari sumur ke lokasi *Elevated Reservoir*

Head statis = 22,25 m

Panjang pipa (L) = 507 m

Diamate pipa (D) = 0.1 m

Koefisien (C) = 130

Debit (Q) = 6,97 Liter/detik, debit dikalikan faktor puncak harian sebesar 1,15 sehingga menjadi 0,08 m³/d

Dihitung *headloss* pipa dengan rumus *Hazzen William* sebagai berikut:

$$hf = \frac{10,675 L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.87}}$$

maka

$$hf = \frac{10,675 (507) \cdot 0.08^{1.852}}{130^{1.852} \cdot 0.1^{4.87}}$$

$$hf = 6.24 \text{ meter}$$

sehingga head total yang dibutuhkan adalah Head Statis + Hf = 28,49 meter

Lampiran C

Perhitungan Hukum Afinitas untuk Perencanaan VSD

$$Q \approx n$$

$$H \approx n^2$$

$$P \approx n^3$$

dimana

Q = debit (liter/detik)

H = head (meter)

P = daya (kWh)

n = kecepatan putar motor (rpm)

Analisis perhitungan kecepatan motor (rpm), debit operasional (liter/detik) dan daya (kWh) pada Sistem Distribusi Summersari adalah sebagai berikut:

persamaan mencari kecepatan sinkron motor (n_s)

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

dengan $f = 50$ hz dan jumlah pole (P) = 2, maka

$$n_s = \frac{120 \cdot 50}{2}$$

$$n_s = 3000 \text{ rpm}$$

melalui persamaan, diketahui slip (s)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$$s = \frac{3000 - 2900}{3000}$$

$$s = 0.03$$

Pengaturan perubahan frekuensi (45 Hz) dengan VSD menghasilkan kecepatan motor sebagai berikut:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

$$n_s = \frac{120 \cdot 45}{2}$$

$$n_s = 2700 \text{ rpm}$$

Jika $n_s = 2700$ rpm maka nilai n_r adalah

$$n_r = n_s - (s \cdot n_s)$$

$$n_r = 2700 - (0.003 \cdot 2700)$$

$$n_r = 2610 \text{ rpm}$$

Jadi jika frekuensi diatur sebesar 45 Hz maka kecepatan motor adalah 2610 rpm. Apabila kecepatan motor diketahui, melalui persamaan hukum afinitas maka debit aliran (liter/detik), head pompa (meter) dan P (daya) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_x = \frac{n_x}{n} \cdot Q$$

$$H_x = \left(\frac{n_x}{n}\right)^2 \cdot H$$

$$P_x = \left(\frac{n_x}{n}\right)^3 \cdot P$$

dimana

Q_x = Debit sesuai frekuensi yang dikehendaki (liter/detik)

Q = Debit pada frekuensi konstan 50 Hz (liter/detik)

H_x = Tekanan sesuai frekuensi yang dikehendaki (meter)

H = Tekanan pada frekuensi konstan 50 Hz (meter)

P_x = Daya sesuai frekuensi yang dikehendaki (kWh)

P = Daya pada frekuensi konstan 50 Hz (kWh)

N_x = frekuensi yang dikehendaki (Hz)

N = frekuensi konstan 50 Hz (Hz)

Tabel Hubungan Antara Perubahan Frekuensi dengan Q, H, dan P

Frekuensi (Hz)	Ns (rpm)	Nr (rpm)	Q (lps)	H (bar)	P (kWh)
50	3000	2900	6.97	6.73	9.35
49	2940	2842	6.83	6.47	8.80
48	2880	2784	6.70	6.20	8.27
47	2820	2726	6.56	5.95	7.77
46	2760	2668	6.42	5.70	7.28
45	2700	2610	6.28	5.45	6.82
44	2640	2552	6.14	5.21	6.37
43	2580	2494	6.00	4.98	5.95
42	2520	2436	5.86	4.75	5.54
41	2460	2378	5.72	4.53	5.16
40	2400	2320	5.58	4.31	4.79

Sumber : Hasil Perhitungan (2021)

Lampiran C

Potensi Penambahan SR karena Penurunan Tekanan

Rumus yang digunakan mengacu pada IWA (*International Water Association*) :

$$\frac{Q_{f1}}{Q_{f0}} = \left(\frac{P_{f1}}{P_{f0}}\right)^{N_1}$$

dengan

Q_{f1} = Debit air yang hilang setelah perubahan tekanan

Q_{f0} = Debit air yang hilang sebelum perubahan tekanan

P_1 = Tekanan setelah dilakukan perubahan

P_0 = Tekanan sebelum dilakukan perubahan

N_1 = Nilai eksponen kebocoran, sebesar 1,14 (Thornton *et. al.*, 2008)

A. Skema *Elevated Reservoir*

$$\frac{Q_{f1}}{Q_{f0}} = \left(\frac{P_{f1}}{P_{f0}}\right)^{N_1}$$

$$Q_{f1} = Q_{f0} \left(\frac{P_{f1}}{P_{f0}}\right)^{N_1}$$

$$Q_{f1} = 317.484 \frac{m^3}{tahun} \left(\frac{26,08 \text{ meter}}{35,70 \text{ meter}}\right)^{1,14}$$

$$Q_{f1} = 183.223 \frac{m^3}{tahun}$$

- Air yang bisa diselamatkan adalah $317.484 - 183.223 = 134.261 \text{ m}^3/\text{tahun}$
- Jumlah SR yang dapat ditambah adalah $134.261 / 176,4 = 761 \text{ SR}$
- Nilai 176,4 adalah rata-rata pemakaian air tahunan per SR di Sistem Sumpersari dalam satuan m^3

B. Skema VSD

$$\frac{Q_{f1}}{Q_{f0}} = \left(\frac{P_{f1}}{P_{f0}}\right)^{N1}$$

$$Q_{f1} = Q_{f0} \left(\frac{P_{f1}}{P_{f0}}\right)^{N1}$$

$$Q_{f1} = 317.484 \frac{m^3}{tahun} \left(\frac{16,23 \text{ meter}}{22.72 \text{ meter}}\right)^{1,14}$$

$$Q_{f1} = 216.454 \frac{m^3}{tahun}$$

- Air yang bisa diselamatkan adalah $317.484 - 216.454 = 101.030 \text{ m}^3/\text{tahun}$
- Jumlah SR yang dapat ditambah adalah $101.030 / 176,4 = 572 \text{ SR}$.
Nilai 176,4 adalah rata-rata pemakaian air tahunan per SR di Sistem Sumpersari.

BIOGRAFI PENULIS



GALIS ASMARA, lahir di Selong (Lombok Timur) pada tanggal 12 Oktober 1995. Penulis adalah anak pertama dari pasangan Bapak Sunaryo, S.H. dan Ibu Suliyah. Pendidikan sekolah yang telah penulis tempuh adalah SDN 3 Selong lulus tahun 2008, SMPN 1 Selong lulus tahun 2011 dan SMAN 2 Selong lulus tahun 2013. Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia (UII), dan lulus pada tahun 2017. Selanjutnya pada tahun 2018, penulis mulai bekerja di Direktorat Air Minum Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Sejak mulai bekerja penulis ditempatkan di Subdit Perencanaan Teknis pada tahun 2018, Subdit Wilayah III pada tahun 2019 dan Subdit Wilayah II pada tahun 2020-sampai dengan saat ini. Pada tahun 2020, penulis berkesempatan mengikuti beasiswa Program Magister Super-Spesialis Bidang Air Minum di Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan magister tersebut pada tahun 2022. Bagi pembaca yang memiliki saran dan kritik terkait tesis ini, dapat menghubungi penulis melalui surat elektronik *galisasmara@pu.go.id* atau *galisasmara@gmail.com*.