OPTIMALISASI OPERASI SISTEM PEMOMPAAN MULTI-MOTOR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN RUGI DAYA PADA KABEL *FEEDER* TEGANGAN MENENGAH

TESIS

Diajukan untuk memenuhi
Persyaratan gelar Magister Teknik

Achmad Pauji

092024090244

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Depok, 8 Agustus 2026

Mahasiswa,



Achmad Pauji

NPM. 092024090244

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Tesis ini diajukan oleh:

Nama	: Achmad Pauji
NIM	: 092024090244
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	: Optimalisasi Operasi Sistem Pemompaan Multi-Motor dengan Mempertimbangkan Rugi Daya pada Kabel Feeder Tegangan Menengah

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta.

DEWAN PEMBIMBING

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.	Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S09201911003	NIK.S092023080003

Ketua Program Studi
Magister Teknik Elektro

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S092023080003

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 8 Agustus 2026

FM/UGJ/L.053

Form B – Lembar Konsultasi ~~Proposal~~ TESIS	Revisi ke: 3 Tanggal revisi: 01 Oktober 2024

LEMBAR KONSULTASI SKRIPSI

Nama mahasiswa : Achmad Pauji
NIM : 092024090244
Judul : OPTIMALISASI OPERASI SISTEM PEMOMPAAN MULTI-MOTOR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN RUGI DAYA PADA KABEL FEEDER TEGANGAN MENENGAH
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, ST., M.T.

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	21.05.2026	Pengarahan terkait evaluasi Progress tesis tahap 1	yza
2	22.05.2026	Pengiriman dan review Revisi sempro (By Email)	yza
3	05.06.2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Faisal & Bp Muhid	yza
4	06.06.2026	Pengiriman dan review Revisi BAB 1-3 dan draft BAB 4 (By Email)	yza
5	10.06.2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah Bp Wisnu & Bp Siswo	yza
6	13.06.2026	Presentasi & Review BAB 1-3	yza

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, Januari 2026
Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Elektro.

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.

FM/UGJ/L.053

Form B – Lembar Konsultasi Proposal	Revisi ke: 3 Tanggal revisi: 01 Oktober 2024

LEMBAR KONSULTASI SKRIPSI

Nama mahasiswa : Achmad Pauji
NIM : 092024090244
Judul : OPTIMALISASI OPERASI SISTEM PEMOMPAAN MULTI-MOTOR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN RUGI DAYA PADA KABEL FEEDER TEGANGAN MENENGAH
Dosen Pembimbing II : Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	21.05.2026	Pengarahan terkait evaluasi Progress tesis tahap 1	
2	22.05.2026	Pengiriman dan review Revisi sempro (By Email)	
3	05.06.2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Faisal & Bp Muhid	
4	06.06.2026	Pengiriman dan review Revisi BAB 1-3 dan draft BAB 4 (By Email)	
5	10.06.2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah Bp Wisnu & Bp Siswo	
6	13.06.2026	Presentasi & Review BAB 1-3	
7			

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, 27 Juni 2026
Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Elektro.

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.

HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh :

Nama	: Achmad Pauji
NIM	: 092024090244
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	:Optimalisasi Operasi Sistem Pmompaan Multi Motor Dengan Mempertimbangkan Rugi Dada Pada Kabel Feeder Tegangan Menengah

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Elektro pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta.

DEWAN PENGUJI

Penguji 1 : Dr. Antonius Darma Setiawan. S.Si., M.T. (.....)

Penguji 2 : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si. (.....)

Penguji 3 : Adhes Gamayel, S.T., M.T., Ph.D. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Agustus 2026

FM/JGU/L.004

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : ACHMAD PAUJI

NIM : 241017002

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Optimalisasi Operasi Sistem Pemompaan Multi-Motor Dengan Mempertimbangkan Rugi Daya Pada Kabel Feeder Tegangan Menengah**

Dosen Penguji II : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1.	Abstrak harus di ringkas dengan lebih banyak fokus pada hasil & kesimpulan	1. Abstrak sudah di ringkas dan fokus pada hasil dan kesimpulan, dapat dilihat pada halaman abstrak halaman VI	6/26
2.	Pada metode jelaskan tahapan pada simulasi optimalisasi operasi sistem pemompaan.	2. Metode sudah di revisi pada BAB 3 , dilihat pada sub BAB 3.11-3.12 halaman 58-63	6/26
3.	Apa hasil perbandingan antara Operasi sistem pembagian dan tanpa Optimalisasi.	3. Hasil perbandingan di jelaskan pada sub BAB 4.10 , Halaman 104-107	6/26
4.	Gunakan diagram, tabel dan gambar untuk menjelaskan hasil penelitian.	4. tabel perbandingan hasi penelitian sudah dijelaskan pada tabel 4.24-4.26 halaman 105-107	6/26

Depok, 6 Agust 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

( )

NIP.

FM/JGU/L.064

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SIDANG SKRIPSI

Nama Mahasiswa : ACHMAD PAUJI

NIM : 241017002

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Optimalisasi Operasi Sistem Pemompaan Multi-Motor Dengan Mempertimbangkan Rugi Daya Pada Kabel Feeder Tegangan Menengah**

Dosen Penguji I : Dr. Antonius Darma Setiawan. S.Si., M.T.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Latar belakang perlu dipenjelas untuk menunjukkan apa yg sebarnya diberikan. Generalisasikan optimalisasi untuk multi beban, multi konfigurasi beban (VSD & non-VSD), & multi feeder	1. Latar belakang sudah dibuat generalisasi dan mengerucut , Halaman 1-5	
2	Tambahkan fungsi objektif untuk model optimalisasi biaya	2. Fungsi Objektif Sudah di tambahkan , pada sub BAB 3.12 , halaman 61-63	
3	hipotesis → hanya H5	3. Hipotesis Sudah diringkas menjadi Ha & H0 , pada sub BAB 2.12 halaman 36-37	
6	kesimpulan diperkaya	4. Kesimpulan sudah di perkaya dengan mengaitkan ke rumusan masalah , BAB 5 halaman 124-125	
7	Persamaan ditulis menggunakan MS equation	5. Persamaan sudah ditulis dengan menggunakan Ms Equation	

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

NIP

FM/JGU/L.064

JGU Jakarta Global University

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : ACHMAD PAUJI

NIM : 241017002

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Optimalisasi Operasi Sistem Pemompaan Multi-Motor Dengan Mempertimbangkan Rugi Daya Pada Kabel Feeder Tegangan Menengah**

Dosen Penguji III : Adhes Gamayel, S.T., M.T., Ph.D.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1.	hal 26 di detailkan	- Gambar 3.1 - 3.4 sudah ditambahkan detail keterangan halaman 44-47	
2	Hubungkan Judul, Bab 3, Bab 4 kan bhu sinkron	- Judul , BAB 3 dan BAB 4 sudah di singkronkan, rugi daya kabel feeder, sistem pemompaan multi-motor dirumuskan metodenya pada BAB III (Subbab 3.6–3.16) dan dibuktikan hasilnya pada BAB IV (Subbab 4.3–4.1	

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

( )

NIP.

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Global Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Achmad Pauji
NIM	: 092024090244
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Jenis Karya Ilmiah	: Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Global Jakarta Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Optimalisasi Operasi Sistem Pemompaan Multi-Motor dengan Mempertimbangkan Rugi Daya pada Kabel Feeder Tegangan Menengah

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Non-eksklusif ini Universitas Global Jakarta berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 8 Agustus 2026



Achmad Pauji

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Tuhan seluruh alam, atas rahmat dan berkat yang telah diterima serta rasa syukur atas terselesaikannya penulisan tesis ini dalam rangka memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik Elektro pada Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer. Tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Untuk itu perkenankan penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Yanuar Zulardiansyah Arief, CEng, selaku Pembimbing 1, atas bimbingan dan arahannya.
2. Bapak Hamzah, S.T., M.T., Ph.D., selaku Pembimbing 2, atas bimbingan dan arahannya.
3. Ibu Sinka Wilyanti, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik Magister Teknik Elektro.
4. Teman-teman Magister Teknik Elektro JGU atas kerja samanya
5. Teman-teman PT Air Bersih Jakarta atas kerja samanya dalam pengambilan data
6. Orang tua, istri, dan anak penulis atas dukungan moril dan doa yang selalu dipanjatkan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan penelitian ini, kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat penulis harapkan.

Akhirnya, penulis berharap semoga penelitian ini dapat bermanfaat dan memberikan informasi bagi rekan-rekan teknik elektro pada khususnya, serta para pembaca pada umumnya.

ABSTRAK

Sistem pemompaan distribusi air bersih di IPA Pulogadung, Jakarta Timur, mengoperasikan sembilan unit motor-pompa induksi tegangan menengah berdaya 340–950 kW secara paralel untuk memenuhi kebutuhan debit yang berubah. Target debit yang sama dapat dicapai melalui kombinasi pompa yang berbeda, tetapi setiap konfigurasi menghasilkan arus *feeder*, rugi daya kabel, penurunan tegangan, konsumsi energi, dan biaya operasi yang berbeda. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan operasi sistem pemompaan multi-motor dengan mempertimbangkan rugi daya pada kabel *feeder* tegangan menengah untuk memperoleh konfigurasi dengan biaya operasi listrik terendah pada layanan hidraulik setara. Analisis dilakukan berdasarkan data kelistrikan aktual dari SCADA, *power meter*, dan catatan operasi pada kondisi *non-peak* dan *peak*. Resistansi kabel dikoreksi terhadap temperatur operasi, rugi daya dihitung sebagai fungsi kuadratik arus, dan efisiensi sistem dievaluasi pada batas sumber–*feeder*–motor. Sebanyak 31 kombinasi struktural dari lima unit kandidat (Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S) disaring terhadap batas hidraulik dan kelistrikan, kemudian dioptimalkan terhadap energi dan biaya menggunakan tarif *time-of-use* PLN. Hasil penelitian menunjukkan konfigurasi optimal berupa kombinasi 2B+3B pada kondisi *non-peak* dan 1B+2B+3B pada kondisi *peak*. Pada layanan hidraulik, durasi, dan tarif yang setara, konfigurasi tersebut menurunkan energi model sebesar 11,84% dan biaya operasi sebesar 11,79% (dari Rp50.625.459 menjadi Rp44.655.999 per hari) dibandingkan pola operasi eksisting. Rugi kabel *feeder* sekitar 64,40 kWh per hari atau 0,15% dari energi harian kelompok unit yang dianalisis sehingga bukan sumber utama penghematan, tetapi tetap diperlukan sebagai komponen fungsi objektif dan pembanding biaya dari sisi sumber. Penghematan biaya melebihi ambang 5% sehingga hipotesis alternatif didukung dalam ruang model. Sebuah prototipe *digital twin* berbasis Node-RED dikembangkan sebagai *dashboard* advisori *human-in-the-loop* untuk membangkitkan, menyaring, dan memeringkat kandidat. Hasil ini merupakan potensi penghematan pada ruang model dan memerlukan verifikasi melalui *trial operation* sebelum diterapkan.

Kata kunci: kabel *feeder*, optimasi biaya energi, rugi daya kabel, sistem pemompaan multi-motor, *variable speed drive*

ABSTRACT

The clean-water distribution pumping system at IPA Pulogadung, East Jakarta, operates nine medium-voltage induction motor-pump units rated 340–950 kW in parallel to meet a varying flow demand. The same target flow can be achieved through different pump combinations, yet each configuration produces different feeder currents, cable power losses, voltage drops, energy consumption, and operating costs. This study aims to optimize the operation of a multi-motor pumping system while considering power losses in the medium-voltage feeder cables, in order to obtain the configuration with the lowest electricity operating cost at an equivalent hydraulic service. The analysis is based on actual electrical data from SCADA, power meters, and operation logs under non-peak and peak conditions. Cable resistance is corrected for the operating temperature, power loss is computed as a quadratic function of current, and system efficiency is evaluated within the source–feeder–motor boundary. Thirty-one structural combinations of five candidate units (Pumps 1B, 2B, 3B, 4B, and 2S) are screened against hydraulic and electrical limits, then optimized for energy and cost using the PLN time-of-use tariff. The results indicate an optimal configuration of 2B+3B under non-peak and 1B+2B+3B under peak conditions. At an equivalent hydraulic service, duration, and tariff, this configuration reduces the model energy by 11.84% and the operating cost by 11.79% (from IDR 50,625,459 to IDR 44,655,999 per day) compared with the existing operation. The feeder cable loss is about 64.40 kWh per day, or 0.15% of the daily energy of the analysed unit group; it is therefore not the primary source of the savings but remains necessary as an objective-function component and a source-side cost comparator. Because the cost saving exceeds the 5% threshold, the alternative hypothesis is supported within the model space. A Node-RED-based digital twin prototype was developed as a human-in-the-loop advisory dashboard to generate, screen, and rank candidates. These results represent potential savings within the model space and require verification through trial operation before implementation.

Keywords: cable power loss, energy cost optimization, feeder cable, multi-motor pumping system, variable speed drive

DAFTAR ISI

JUDUL i
PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS ..... **Error! Bookmark not defined.**
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING ..... **Error! Bookmark not defined.**
HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI..... **Error! Bookmark not defined.**
KATA PENGANTAR xi
ABSTRAK xii
DAFTAR ISI xiv
DAFTAR GAMBAR xx
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR LAMPIRAN xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 5
1.3 Tujuan Penelitian 7
1.4 Manfaat Penelitian 8
1.4.1 Manfaat Akademik 8
1.4.2 Manfaat Teknis 8
1.4.3 Manfaat Praktis 9
1.5 Batasan Masalah 10
1.6 Sistematika Penulisan 13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 16
2.1 Motor Induksi Tegangan Menengah pada Beban Dinamis 16
2.1.1 Karakteristik Motor Induksi Tegangan Menengah 16
2.1.2 Karakteristik Pembebanan Dinamis 17
2.1.3 Pengoperasian Menggunakan VSD dan *Fixed-Speed* 17
2.2 Karakteristik Beban Pompa Sentrifugal 19
2.2.1 Kurva Pompa, Kurva Sistem, dan Titik Operasi 19
2.2.2 Hukum Afinitas dan Pengaturan Kecepatan 19
2.2.3 Operasi Paralel dan Target Debit 20

2.3 Sistem Suplai dan Kabel *Feeder* Tegangan Menengah 20
2.3.1 Batas Sistem Sumber-*Feeder*-Motor-Pompa 20
2.3.2 Parameter Teknis Kabel *Feeder* 21
2.4 Resistansi, Rugi Daya, dan Rugi Energi Kabel *Feeder* 22
2.4.1 Resistansi pada Temperatur Operasi 22
2.4.2 Rugi Daya Aktif Kabel 22
2.4.3 Rugi Energi dan Dampaknya terhadap Biaya Operasional 23
2.5 Penurunan Tegangan dan Batas Operasi Motor 24
2.6 Efisiensi Operasional Kelistrikan pada Batas Sumber-*Feeder*-Motor 24
2.6.1 Definisi dan Batas Perhitungan 24
2.6.2 Peran Efisiensi dalam Evaluasi Konfigurasi 25
2.7 Optimasi Operasi Sistem Pemompaan dan Biaya Energi 26
2.7.1 Evaluasi Kandidat Konfigurasi 26
2.7.2 Fungsi Objektif Energi 26
2.7.3 Fungsi Objektif Biaya dan Tarif *Time-of-Use* 27
2.7.4 Batas Kelayakan Teknis 27
2.8 Analisis Sensitivitas Parameter Operasi dan Kabel 28
2.9 Konsep *Digital Twin* untuk Sistem Pemompaan 28
2.9.1 Tingkat Kematangan dan Batas Implementasi 29
2.9.2 Arsitektur *Digital Twin* Operasional 29
2.9.3 Sinkronisasi Data, Simulasi *What-if*, dan *Human-in-the-Loop* 30
2.9.4 *Digital Twin* sebagai Luaran Penelitian 31
2.10 Penelitian Terdahulu 31
2.11 Research Gap dan Kebaruan Penelitian 34
2.12 Hipotesis Penelitian 36
BAB III METODE PENELITIAN 37
3.1 Pendekatan dan Desain Penelitian 38
3.2 Objek, Lokasi, Unit Analisis, Skenario, dan Sumber Data Penelitian 39
3.2.1 Objek dan Unit Analisis Penelitian 39
3.2.2 Lokasi Penelitian 41

3.2.3 Skenario, Periode, Resolusi, dan Klasifikasi Data Operasi 42
3.2.4 Sumber Data dan Instrumen Penelitian 43
3.3 Variabel Penelitian 47
3.3.1 Variabel Keputusan Operasi 47
3.3.2 Variabel Input dan Parameter Sistem 47
3.3.3 Variabel Hasil Analisis 48
3.3.4 Variabel Kontrol dan Batas Kelayakan 48
3.4 Pengolahan dan Klasifikasi Data Operasi 49
3.4.1 Sinkronisasi, Penyaringan, dan Pemeriksaan Data 49
3.4.2 Analisis Titik Operasi dan Deret Waktu 50
3.4.3 Identifikasi Modulasi VSD 50
3.5 Model Hidraulik dan Penentuan Titik Operasi Pemompaan 51
3.5.1 Debit, Kecepatan Aliran, dan *Total Dynamic Head* 51
3.5.2 Kurva Pompa, Kurva Sistem, dan Pengaruh VSD 52
3.6 Verifikasi Parameter Teknis Motor dan Kabel *Feeder* 53
3.6.1 Parameter Motor Induksi dan Pompa 53
3.6.2 Parameter Kabel *Feeder* 54
3.7 Perhitungan Resistansi dan Rugi Daya Kabel *Feeder* 55
3.7.1 Resistansi Aktual pada Temperatur Operasi 55
3.7.2 Rugi Daya pada Titik Operasi Representatif 55
3.7.3 Integrasi Rugi Energi Deret Waktu 56
3.8 Analisis Penurunan Tegangan Terminal Motor 56
3.9 Analisis Arus Motor dan Kelayakan Pembebanan 57
3.10 Perhitungan Efisiensi Operasional Sistem 58
3.11 Evaluasi Kandidat Konfigurasi Operasi Pompa 58
3.11.1 Penyaringan Hidraulik dan Teknis 60
3.11.2 Pemodelan Daya Kandidat 60
3.12 Optimasi Energi dan Biaya Operasi 61
3.12.1 Fungsi Objektif Energi 62
3.12.2 Perhitungan Biaya *Time-of-Use* 62

3.12.3 Pemilihan Solusi dan Perhitungan Penghematan 62
3.13 Analisis Sensitivitas Parameter Operasi dan Kabel 63
3.13.1 Sensitivitas terhadap Arus Operasi 64
3.13.2 Sensitivitas terhadap Temperatur Kabel 65
3.13.3 Sensitivitas terhadap Panjang *Feeder* 65
3.13.4 Sensitivitas terhadap Luas Penampang 65
3.14 Pengujian Hipotesis Penelitian 65
3.15 Validasi Model terhadap Data Pengukuran 66
3.16 Perancangan Prototipe *Digital Twin* Operasional 68
3.16.1 Lingkup dan Tingkat Implementasi 68
3.16.2 Arsitektur dan Aliran Data 68
3.16.3 Pemetaan Aset, Tag, dan Model Digital 69
3.16.4 Siklus Pembaruan dan Perhitungan 70
3.16.5 Logika Simulasi *What-if* dan Rekomendasi 71
3.16.6 Implementasi Perangkat Lunak dan Validasi Fungsi 71
3.17 Diagram Alur Penelitian 71
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 73
4.1 Gambaran Umum Pelaksanaan Penelitian 73
4.2 Penyajian dan Klasifikasi Data Operasi Sistem Pemompaan 75
4.2.1 Data Operasi Pompa pada Kondisi *Non-Peak* 76
4.2.2 Data Operasi Pompa pada Kondisi *Peak* 76
4.2.3 Rekapitulasi Pola Operasi Eksisting 77
4.2.4 Profil Operasi dan Bukti Modulasi VSD 78
4.3 Verifikasi Parameter Teknis Motor dan Kabel *Feeder* 80
4.3.1 Verifikasi Parameter Motor Induksi 81
4.3.2 Verifikasi Parameter Kabel *Feeder* 82
4.4 Hasil Perhitungan Resistansi Aktual Kabel *Feeder* 83
4.5 Hasil Analisis Rugi Daya Kabel *Feeder* 85
4.5.1 Rugi Daya Kabel pada Kondisi *Non-Peak* 85
4.5.2 Rugi Daya Kabel pada Kondisi *Peak* 85

4.5.3 Perbandingan Rugi Daya *Non-Peak* dan *Peak* 86
4.5.4 Validasi Perhitungan Rugi Daya dengan Rekaman Arus 24 Jam 87
4.6 Hasil Analisis Penurunan Tegangan Terminal Motor 88
4.6.1 Penurunan Tegangan Kondisi *Non-Peak* 88
4.6.2 Penurunan Tegangan Kondisi *Peak* 89
4.6.3 Evaluasi Kelayakan Tegangan Terminal 89
4.7 Hasil Analisis Arus Motor Induksi 90
4.8 Hasil Perhitungan Efisiensi Operasional Sistem 91
4.8.1 Efisiensi Operasional Kondisi Eksisting 91
4.8.2 Efisiensi Aktual dengan Mempertimbangkan Rugi Kabel 92
4.9 Hasil Evaluasi 31 Kombinasi Operasi Pompa 93
4.9.1 Dasar Kalibrasi Model Kandidat 94
4.9.2 Penyaringan Kandidat Kondisi *Non-Peak* 95
4.9.3 Penyaringan Kandidat Kondisi *Peak* 98
4.9.4 Batas Interpretasi Hasil Kandidat 100
4.10 Hasil Optimasi Energi dan Biaya Operasi 101
4.10.1 Penentuan Konfigurasi Operasi Optimal 101
4.10.2 Penghematan Energi Harian 101
4.10.3 Penghematan Biaya Operasi 103
4.11 Analisis Sensitivitas Parameter Operasi dan Kabel 104
4.11.1 Sensitivitas terhadap Arus Operasi 104
4.11.2 Sensitivitas terhadap Temperatur Kabel 104
4.11.3 Sensitivitas terhadap Panjang *Feeder* 105
4.11.4 Sensitivitas terhadap Luas Penampang Kabel 105
4.12 Pembuktian Hipotesis Penelitian 106
4.13 Pembahasan Hasil Penelitian 107
4.13.1 Implikasi Rugi Daya Kabel terhadap Operasi Sistem Pemompaan 107
4.13.2 Implikasi Konfigurasi Multi-Pompa terhadap Efisiensi Energi 109
4.13.3 Kesesuaian Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu 109
4.13.4 Kontribusi Penelitian 109

4.14 Rekomendasi Operasional Bersyarat 110
4.15 Validasi Model terhadap Data Pengukuran..... 111
4.15.1 Pemeriksaan Konsistensi *Baseline* Kelistrikan dan Titik Operasi 111
4.15.2 Validasi Kelistrikan dan Keterbatasan Model Hidraulik Pompa 2B 114
4.16 Implementasi Prototipe *Digital Twin* Operasional..... 115
4.16.1 Arsitektur dan Modul Perangkat Lunak Berbasis Node-RED 115
4.16.2 Mode Data, Dasar Perhitungan, dan Logika Kandidat 116
4.16.3 Antarmuka Pemilihan Pompa, *Dashboard*, dan Informasi Operator..... 116
4.16.4 Pengujian dan Validasi Fungsi Perangkat Lunak..... 117
4.16.5 Tingkat Kesiapan dan Keterbatasan Implementasi..... 118
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... 119
5.1 Kesimpulan 119
5.2 Saran..... 120
5.2.1 Saran Operasional 120
5.2.2 Saran Penelitian Lanjutan 121
DAFTAR PUSTAKA 122
LAMPIRAN..... 127
Lampiran 1. Dokumentasi Pengukuran Temperatur Permukaan Kabel *Feeder* 127
Lampiran 2. Dokumentasi Verifikasi Pengukuran..... 128
Lampiran 3. Grafik Rekaman SCADA (HMI)..... 129
Lampiran 4. *Nameplate* Motor dan Pompa..... 132
Lampiran 5. Tabel Penyaringan Lengkap 31 Kombinasi dan Data Pendukung 137

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor tegangan menengah berdaya besar 16
Gambar 2.2 Motor dan pompa tegangan menengah pada sistem pemompaan 18
Gambar 2.3 Skema sistem kelistrikan pemompaan IPA Pulogadung 21
Gambar 2.4 Arsitektur konseptual prototipe *digital twin* operasional 30
Gambar 3.1 Panel *feeder* 44
Gambar 3.2 Tampilan sistem SCADA 45
Gambar 3.3 Grafik monitoring SCADA 46
Gambar 3.4 *Data logging* SCADA 46
Gambar 3.5 Arsitektur prototipe *digital twin* operasional IPA Pulogadung 68
Gambar 4.1 Profil operasi distribusi 16–24 Juni 2026: debit dan tekanan. 79
Gambar 4.2 Tren arus aktual Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S. 79
Gambar 4.3 Pemeringkatan Kandidat Layak pada Kondisi *Non-Peak* 98
Gambar 4.4 Pemeringkatan Kandidat Layak pada Kondisi *Peak* 100
Gambar 4.5 Perbandingan Energi Eksisting dan Konfigurasi Optimal 103
Gambar 4.6 Porsi Rugi *Feeder* terhadap Penghematan Energi Harian 108
Gambar 4.7 Diagram paritas arus terukur terhadap arus model 112
Gambar 4.8 Estimasi rugi kabel menurut basis perhitungan arus 112
Gambar 4.9 Kesetaraan Debit dan *Head* pada Basis Perbandingan Optimasi 113
Gambar 4.10 Rancangan *Dashboard Digital Twin* Lima Unit dan 31 Kombinasi ... 117

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Matriks penelitian terdahulu berdasarkan aspek integrasi sistem 31
Tabel 2.2 Indikator pembuktian hipotesis penelitian 37
Tabel 3.1 Status data dan peran unit kandidat dalam penelitian 40
Tabel 3.2 Skenario operasi pemompaan 43
Tabel 3.3 Kriteria pengolahan dan penerimaan data operasi 50
Tabel 3.4 Data dasar nozzle untuk model hidraulik 52
Tabel 3.5 Parameter motor dan kapasitas pompa 53
Tabel 3.6 Parameter kabel *feeder* sebagai input perhitungan 54
Tabel 3.7 Ruang pencarian dan ketentuan kandidat konfigurasi 59
Tabel 3.8 Skenario analisis sensitivitas parameter operasi dan kabel 63
Tabel 3.9 Kriteria pengujian hipotesis 66
Tabel 3.10 Rencana dan kriteria validasi model 67
Tabel 3.11 Pemetaan komponen prototipe *digital twin* operasional 69
Tabel 4.1 Ringkasan Pelaksanaan Penelitian 74
Tabel 4.2 Data Operasi Sistem Pemompaan pada Kondisi *Non-Peak* 76
Tabel 4.3 Data Operasi Sistem Pemompaan pada Kondisi *Peak* 77
Tabel 4.4 Rekapitulasi Konfigurasi Operasi Eksisting 78
Tabel 4.5 Statistik Arus Operasi 24 Jam pada *Feeder Baseline* Terverifikasi 80
Tabel 4.6 Parameter Teknis Motor Induksi Sistem Pemompaan 81
Tabel 4.7 Parameter Aktual Kabel *Feeder* 82
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Resistansi Kabel pada Temperatur Operasi 84
Tabel 4.9 Rugi Daya Kabel *Feeder* pada Kondisi *Non-Peak* 85
Tabel 4.10 Rugi Daya Kabel *Feeder* pada Kondisi *Peak* 86
Tabel 4.11 Perbandingan Rugi Daya Kabel Berdasarkan Kondisi Operasi 86
Tabel 4.12 Perbandingan Tiga Basis Perhitungan Rugi Kabel *Feeder* 87
Tabel 4.13 Tegangan Terminal Motor pada Kondisi *Non-Peak* 88
Tabel 4.14 Tegangan Terminal Motor pada Kondisi *Peak* 89
Tabel 4.15 Rekapitulasi Kelayakan Tegangan Terminal 90
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Arus Motor pada Setiap Skenario 90

Tabel 4.17 Neraca Daya dan Efisiensi Motor-*Feeder* pada Pola Operasi Eksisting .. 92
Tabel 4.18 Perbandingan Efisiensi Nominal dan Efisiensi Motor-*Feeder* Aktual 92
Tabel 4.19 Dasar Kalibrasi Lima Unit Kandidat 94
Tabel 4.20 Ringkasan Constraint Kandidat Layak pada Kondisi *Non-Peak* 95
Tabel 4.21 Ringkasan Constraint Kandidat Layak pada Kondisi *Peak* 98
Tabel 4.22 Perbandingan Konfigurasi Eksisting dan Optimal..... 101
Tabel 4.23 Estimasi Penghematan Energi Harian..... 102
Tabel 4.24 Estimasi Penghematan Biaya Operasi Harian..... 103
Tabel 4.25 Hasil Analisis Sensitivitas Parameter Operasi dan Kabel..... 105
Tabel 4.26 Rekapitulasi Pembuktian Hipotesis 106
Tabel 4.27 Kontribusi Penelitian setelah Perluasan Kandidat 110
Tabel 4.28 Rekomendasi Operasi Sistem Pemompaan..... 111
Tabel 4.29 Verifikasi Kesetaraan Debit dan *Head* pada Basis Perbandingan Optimasi 113
Tabel 4.30 Verifikasi Perbedaan *Feeder* Pompa 2B dan Pompa 3B 114

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Pengukuran Temperatur Permukaan Kabel *Feeder* 126
Lampiran 2. Dokumentasi Verifikasi Pengukuran 127
Lampiran 3. Grafik Rekaman SCADA (HMI) 128
Lampiran 4. *Nameplate* Motor dan Pompa 131
Lampiran 5. Tabel Penyaringan Lengkap 31 Kombinasi dan Data Pendukung 137

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi tegangan menengah atau *medium-voltage* motor banyak digunakan pada sistem industri dan utilitas yang membutuhkan daya besar, operasi kontinu, dan tingkat keandalan tinggi. Dalam penerapannya, motor tidak selalu bekerja pada kondisi beban konstan. Kebutuhan proses dapat berubah terhadap waktu sehingga torsi, daya mekanik, daya listrik, faktor daya, dan arus operasi motor ikut berubah. Kondisi tersebut membentuk karakteristik beban dinamis yang perlu dievaluasi berdasarkan profil operasi aktual, bukan hanya berdasarkan daya dan arus nominal pada *nameplate*. Oleh karena itu, efisiensi sistem motor perlu dianalisis sebagai hubungan antara sumber listrik, perangkat kendali, motor, transmisi daya, dan beban mekanik yang digerakkan. Pengaturan motor dengan beban dinamis umumnya dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu pengoperasian dengan *variable speed drive* (VSD) dan pengoperasian pada kecepatan tetap atau *fixed-speed*. VSD mengatur frekuensi dan tegangan suplai sehingga kecepatan motor dapat dimodulasi mengikuti kebutuhan proses. Perubahan kecepatan tersebut memengaruhi daya dan arus motor secara langsung. Sebaliknya, motor *fixed-speed* beroperasi pada kecepatan yang relatif tetap, sedangkan penyesuaian kapasitas proses dilakukan melalui pengaturan mekanis, pembukaan katup, *damper*, atau perubahan jumlah unit yang dioperasikan. Perbedaan metode pengendalian ini menyebabkan motor VSD dan *fixed-speed* memiliki profil arus serta konsumsi energi yang berbeda ketika menghadapi perubahan beban.

Salah satu beban dinamis yang banyak digerakkan oleh motor tegangan menengah adalah pompa sentrifugal pada sistem pengolahan dan distribusi air. Kebutuhan debit dan tekanan air berubah mengikuti pola konsumsi, kondisi jaringan, dan waktu operasi. Perubahan kebutuhan hidraulik tersebut menyebabkan titik operasi pompa bergeser dan memengaruhi daya poros serta arus motor. Pada pompa ber-VSD, debit dapat disesuaikan melalui perubahan putaran sesuai hukum afinitas. Pada pompa *fixed-speed*,

penyesuaian aliran umumnya dilakukan melalui *throttling* atau perubahan jumlah unit yang dioperasikan, sehingga daya poros dan arus motor tidak selalu turun sebanding dengan penurunan debit.

Pada sistem pemompaan berkapasitas besar, beberapa unit motor-pompa dioperasikan secara paralel untuk memenuhi kebutuhan debit yang berubah dari kondisi rendah sampai kondisi tinggi. Target debit yang sama dapat dicapai melalui kombinasi pompa yang berbeda, misalnya dengan mengoperasikan satu pompa berkapasitas besar, beberapa pompa berkapasitas lebih kecil, atau kombinasi pompa VSD dan *fixed-speed*. Meskipun keluaran debitnya serupa, setiap konfigurasi dapat menghasilkan distribusi beban, daya listrik, faktor daya, arus motor, dan durasi operasi yang berbeda. Oleh sebab itu, keputusan operasi tidak cukup hanya didasarkan pada kemampuan memenuhi debit, tetapi perlu mempertimbangkan kinerja energi dari keseluruhan konfigurasi motor-pompa.

Kondisi tersebut terdapat pada sistem pemompaan distribusi air bersih di Instalasi Pengolahan Air (IPA) Pulogadung, Jakarta Timur. IPA Pulogadung memiliki kapasitas produksi rata-rata sekitar 4.500 liter per detik dan menggunakan sembilan unit motor-pompa tegangan menengah dengan tiga kelompok kapasitas. Kelompok pertama terdiri atas dua unit pompa berkapasitas nominal 1.500 liter per detik dengan motor 950 kW. Kelompok kedua terdiri atas lima unit pompa berkapasitas nominal 1.000 liter per detik dengan motor 650 kW. Kelompok ketiga terdiri atas dua unit pompa berkapasitas nominal 500 liter per detik dengan motor 340 kW. Berdasarkan sistem penggeraknya, Pompa 1B, 2B, dan 3B menggunakan VSD, sedangkan Pompa 4B sampai 7B serta Pompa 1S dan 2S beroperasi pada kecepatan tetap dengan pengaturan aliran melalui *throttling*.

Operasi harian IPA Pulogadung harus menyesuaikan variasi kebutuhan distribusi air, sehingga jumlah pompa aktif dan pembagian beban antarunit berubah sepanjang waktu. Pada kondisi *non-peak*, kebutuhan debit dapat dipenuhi dengan jumlah unit yang lebih sedikit atau dengan memaksimalkan modulasi pompa ber-VSD. Pada kondisi *peak*, sistem memerlukan tambahan pompa *fixed-speed* dan pembagian beban yang lebih besar pada pompa VSD. Data SCADA, *power meter*, dan catatan operasi menunjukkan

bahwa perubahan konfigurasi tersebut diikuti oleh perubahan arus *feeder*, daya aktif, dan faktor daya pada setiap unit. Dengan demikian, konsumsi energi harian tidak hanya ditentukan oleh besarnya debit yang dihasilkan, tetapi juga oleh kombinasi unit yang dipilih untuk memenuhi debit tersebut.

Setiap motor pada sistem tersebut memperoleh suplai melalui kabel *feeder* tegangan menengah yang memiliki resistansi dan reaktansi. Arus motor yang berubah akibat beban dinamis, metode pengendalian, dan kombinasi pompa akan menghasilkan rugi daya kabel yang juga berubah. Rugi daya resistif mengikuti hubungan kuadratik terhadap arus, sehingga peningkatan arus dapat meningkatkan rugi daya lebih cepat daripada kenaikan bebannya. Nilai rugi juga dipengaruhi oleh panjang *feeder*, luas penampang, jenis konstruksi kabel, material konduktor, dan temperatur operasi. Selain menimbulkan rugi energi, impedansi kabel menyebabkan penurunan tegangan pada terminal motor yang harus tetap berada dalam batas operasi teknis (Rozegnał et al., 2021; Paramonov et al., 2023).

Urgensi penelitian menjadi semakin kuat karena sistem pemompaan IPA Pulogadung mengoperasikan motor-pompa berdaya 340–950 kW dengan total daya terpasang sekitar 5,83 MW. Pada skala daya tersebut, rugi kabel *feeder* yang secara persentase tampak kecil tidak dapat dianggap tidak signifikan. Rugi daya terjadi setiap kali motor beroperasi, meningkat secara kuadratik terhadap arus, dan terakumulasi selama durasi operasi menjadi energi yang tetap harus disuplai dan dibayar, tetapi tidak dikonversi menjadi daya mekanik pompa. Dampak ekonominya semakin nyata ketika pompa berdaya besar beroperasi dalam waktu lama atau ketika beberapa unit motor tegangan menengah dijalankan secara paralel untuk memenuhi kebutuhan debit pada kondisi beban tinggi.

Konfigurasi pemompaan yang menghasilkan debit sama dapat membebani *feeder* secara berbeda karena kapasitas motor, metode pengendalian VSD atau *fixed-speed*, pembagian beban, faktor daya, dan durasi operasi setiap unit tidak identik. Oleh karena itu, konfigurasi yang terlihat efisien apabila hanya dinilai dari daya motor belum tentu menghasilkan energi dan biaya minimum apabila rugi penyaluran pada *feeder* diabaikan. Pengabaian rugi kabel dapat menyamarkan penghematan yang sebenarnya,

mengurangi akurasi perbandingan antar konfigurasi, dan mengarahkan keputusan operasi pada kombinasi pompa yang memenuhi debit tetapi bukan yang paling hemat energi dan biaya pada batas sistem sumber-*feeder*-motor-pompa.

Penelitian terdahulu telah membahas penghematan energi pada pompa VSD dan *fixed-speed*, efisiensi operasi pompa paralel, optimasi penjadwalan pompa, serta karakteristik rugi dan penurunan tegangan pada kabel. Oshurbekov et al. (2020) membandingkan konsumsi energi antara pompa berkecepatan variabel dan kombinasi pompa berkecepatan variabel serta tetap. Oshurbekov et al. (2021a, 2021b) menunjukkan bahwa pemilihan titik operasi dan metode regulasi memengaruhi efisiensi sistem pompa paralel. Paramonov et al. (2023) membahas pengaruh panjang kabel dan penurunan tegangan terhadap motor penggerak pompa. Namun, kajian tersebut masih cenderung menempatkan operasi pompa dan kabel *feeder* sebagai bagian analisis yang terpisah, sehingga rugi kabel belum secara konsisten digunakan sebagai variabel dinamis dalam penentuan konfigurasi pemompaan multi-motor.

Berdasarkan kondisi tersebut, optimalisasi operasi pemompaan perlu dilakukan pada batas sistem yang mencakup sumber, kabel *feeder*, motor, dan pompa, bukan hanya pada daya motor atau kemampuan pemenuhan debit. Kerangka evaluasi harus mengintegrasikan karakteristik beban dinamis motor tegangan menengah, penggunaan VSD dan *fixed-speed*, kebutuhan debit dan *head*, arus *feeder*, rugi daya kabel, penurunan tegangan, konsumsi energi, serta biaya listrik. Penelitian ini membandingkan konfigurasi operasi eksisting dengan alternatif yang dibangkitkan dari lima unit kandidat, yaitu Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S. Pada *baseline* utama Juni 2026, Pompa 2B dan Pompa 3B tercatat beroperasi pada periode yang berbeda. Data SCADA tambahan 24–26 Juli 2026 menunjukkan bahwa kedua tag arus dapat aktif secara bersamaan, tetapi data tambahan tersebut tidak memuat seluruh status unit, *interlock*, faktor daya, dan frekuensi VSD pada interval yang sama. Oleh karena itu, operasi simultan 2B–3B diakui sebagai kondisi yang pernah teramati, tetapi kelayakan kandidat optimum tetap dinilai secara kondisional. Data kelistrikan kedua unit berasal dari historian dan pengukuran lapangan, sedangkan karakteristik hidraulik individual Pompa 2B menggunakan model terkalibrasi dengan Pompa 3B sebagai unit sejenis

karena *flow meter* individual, tekanan *suction* dan *discharge*, serta tag frekuensi VSD kontinu belum tersedia pada seluruh interval.

Sebagai bentuk implementasi dari kerangka tersebut, penelitian mengembangkan prototipe *digital twin* operasional yang menghubungkan data sistem fisik, model hidraulik, model motor dan *feeder*, perhitungan energi, serta evaluasi biaya dalam satu representasi digital. Prototipe menerima pembaruan data SCADA atau file historian secara satu arah, menghitung kondisi aktual, membangkitkan dan mengevaluasi 31 kombinasi struktural tidak kosong dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S, menjalankan simulasi *what-if* pada setelan VSD yang layak, serta menampilkan rekomendasi pada *dashboard*. Pada aset digital Pompa 2B, data arus, tegangan, faktor daya, temperatur kabel, status, waktu operasi, dan parameter *feeder* diperlakukan sebagai data aktual, sedangkan debit individual, *head*, dan kurva pompa diberi status sebagai keluaran model hidraulik terkalibrasi. Keputusan operasi tetap dilakukan oleh operator, sehingga prototipe berfungsi sebagai decision-support system dan tidak mengirim perintah otomatis ke PLC atau VSD.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, inti permasalahan penelitian ini adalah belum terintegrasinya karakteristik operasi motor-pompa, rugi daya kabel *feeder* tegangan menengah, dan biaya energi dalam penentuan konfigurasi operasi sistem pemompaan multi-motor. Pada instalasi berdaya besar dengan kombinasi penggerak VSD dan *fixed-speed*, perubahan kebutuhan debit menyebabkan perubahan jumlah unit aktif, distribusi beban, arus *feeder*, dan durasi operasi. Apabila keputusan operasi hanya didasarkan pada pemenuhan debit dan daya motor, energi yang hilang pada *feeder* dapat terabaikan, sehingga konfigurasi yang layak secara hidraulik belum tentu menghasilkan konsumsi energi dari sumber dan biaya operasi yang minimum.

Permasalahan penelitian diidentifikasi sebagai berikut:

1. Profil arus motor-pompa berubah secara dinamis mengikuti kebutuhan debit, jumlah unit aktif, distribusi beban, dan metode pengendalian VSD atau *fixed-*

speed, tetapi perubahan tersebut belum seluruhnya digunakan untuk menghitung rugi energi *feeder* secara berbasis waktu.

2. Rugi daya kabel *feeder* mengikuti hubungan kuadratik terhadap arus dan terakumulasi selama durasi operasi. Oleh karena itu, rugi sesaat yang tampak kecil dapat menghasilkan tambahan konsumsi energi dan biaya listrik yang signifikan pada sistem pompa berdaya besar yang beroperasi secara kontinu.

3. Konfigurasi pompa yang memenuhi kebutuhan debit yang sama dapat menghasilkan arus *feeder*, rugi daya kabel, penurunan tegangan, konsumsi energi dari sumber, dan biaya operasi yang berbeda karena kapasitas unit, pembagian beban, faktor daya, dan durasi operasi setiap pompa tidak identik.

4. Pemilihan konfigurasi operasi tidak hanya harus meminimalkan energi dan biaya, tetapi juga harus memenuhi target debit serta batas teknis arus motor dan penurunan tegangan pada terminal motor.

5. Diperlukan kerangka evaluasi terintegrasi yang tidak hanya membandingkan konfigurasi eksisting, tetapi juga menelusuri kombinasi alternatif dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S berdasarkan kinerja hidraulik, karakteristik motor, rugi kabel *feeder*, konsumsi energi, dan biaya operasi pada kondisi *non-peak* dan *peak*.

Berdasarkan identifikasi tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik rugi daya dan rugi energi kabel *feeder* tegangan menengah berdasarkan profil arus aktual motor-pompa berpenggerak VSD dan *fixed-speed*, serta seberapa sensitif hasilnya terhadap perubahan arus operasi, temperatur konduktor, panjang *feeder*, dan luas penampang kabel?

2. Bagaimana pengaruh perubahan konfigurasi jumlah pompa aktif dan distribusi beban antara pompa berpenggerak VSD dan *fixed-speed* pada kondisi *non-peak* dan *peak* terhadap arus *feeder*, penurunan tegangan terminal motor, konsumsi energi dari sumber, efisiensi operasional, dan biaya listrik dalam memenuhi kebutuhan debit?

3. Konfigurasi operasi manakah, dari 31 kombinasi struktural tidak kosong yang dibentuk dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S serta sub-skenario pengaturan VSD

yang layak, yang menghasilkan konsumsi energi dari sumber dan biaya operasi minimum pada debit dan *head* yang setara dengan *baseline* serta tetap memenuhi batas arus dan penurunan tegangan, berapa besar penghematannya dibandingkan dengan konfigurasi eksisting, serta bagaimana prototipe *digital twin* operasional dapat menyajikan kondisi aktual, kelayakan kandidat, dan rekomendasi konfigurasi tersebut kepada operator?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini disusun secara langsung untuk menjawab setiap rumusan masalah. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung dan menganalisis rugi daya serta rugi energi kabel *feeder* tegangan menengah berdasarkan profil arus aktual motor-pompa berpenggerak VSD dan *fixed-speed*, serta mengevaluasi sensitivitasnya terhadap perubahan arus operasi, temperatur konduktor, panjang *feeder*, dan luas penampang kabel.
2. Mengevaluasi pengaruh perubahan konfigurasi jumlah pompa aktif dan distribusi beban antara pompa berpenggerak VSD dan *fixed-speed* pada kondisi *non-peak* dan *peak* terhadap arus *feeder*, penurunan tegangan terminal motor, konsumsi energi dari sumber, efisiensi operasional, dan biaya listrik dalam memenuhi kebutuhan debit.
3. Menentukan konfigurasi operasi optimum melalui evaluasi 31 kombinasi struktural tidak kosong dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S beserta sub-skenario pengaturan VSD yang layak, dengan meminimalkan konsumsi energi dari sumber dan biaya operasi, serta mengkuantifikasi penghematan energi dan biaya dibandingkan dengan konfigurasi eksisting pada debit dan *head* yang setara dengan *baseline* tanpa melanggar batas arus dan batas penurunan tegangan, kemudian mengimplementasikan model tersebut dalam prototipe *digital twin* operasional yang menyajikan kondisi aktual, simulasi *what-if*, dan rekomendasi keputusan dengan operator sebagai pengambil keputusan akhir.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini disusun sejalan dengan tiga tujuan penelitian, yaitu pengukuran rugi energi *feeder* berbasis profil arus aktual, evaluasi dampak konfigurasi operasi motor-pompa terhadap kinerja energi dan biaya, serta penentuan konfigurasi operasi yang paling ekonomis dengan tetap memenuhi batas teknis. Manfaat penelitian dikelompokkan menjadi manfaat akademik, teknis, dan praktis.

1.4.1 Manfaat Akademik

Secara akademik, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan kajian efisiensi energi sistem pemompaan multi-motor tegangan menengah dengan mengintegrasikan beban pompa yang dinamis, penggunaan penggerak VSD dan *fixed-speed*, karakteristik motor induksi, serta rugi daya kabel *feeder* dalam satu kerangka analisis. Pendekatan ini menempatkan rugi *feeder* sebagai bagian dari konsumsi energi sistem yang berubah mengikuti profil arus dan konfigurasi operasi, bukan sebagai nilai koreksi tetap yang terpisah dari keputusan pengoperasian pompa.

Penelitian ini juga memperluas kajian optimasi operasi multi-pompa melalui penggunaan data arus aktual berbasis waktu untuk menghitung rugi daya dan rugi energi kabel, kemudian menghubungkannya dengan konsumsi energi dari sumber dan biaya listrik. Kerangka tersebut dapat menjadi referensi metodologis bagi penelitian selanjutnya yang membahas optimasi motor-pompa-*feeder* pada instalasi industri atau utilitas air dengan karakteristik beban dinamis dan kombinasi metode pengendalian yang berbeda.

1.4.2 Manfaat Teknis

Secara teknis, penelitian ini menghasilkan prosedur analisis yang dapat digunakan untuk menghitung resistansi kabel pada temperatur operasi, rugi daya sesaat, rugi energi berbasis waktu, penurunan tegangan terminal motor, konsumsi energi dari sumber, efisiensi operasional, dan biaya listrik pada setiap konfigurasi pompa. Prosedur tersebut menggunakan profil arus aktual sehingga mampu menggambarkan perbedaan karakteristik pompa berpenggerak VSD dan fixed-speed pada kondisi non-peak dan peak.

Penelitian ini juga memberikan metode untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap rugi *feeder* melalui analisis sensitivitas arus, temperatur konduktor, panjang *feeder*, dan luas penampang kabel. Selanjutnya, konfigurasi eksisting dan 31 kombinasi struktural dari lima unit kandidat dapat dibandingkan berdasarkan target debit, batas arus motor, batas penurunan tegangan, konsumsi energi, dan biaya operasi. Hasilnya berupa dasar evaluasi teknis untuk memilih konfigurasi yang layak dan efisien tanpa melakukan perubahan desain motor, pompa, atau kabel.

1.4.3 Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini memberikan dasar kuantitatif bagi operator dan pengelola IPA Pulogadung dalam menentukan jumlah unit yang dioperasikan, kombinasi Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S, serta pembagian beban antara unit VSD dan *fixed-speed* untuk memenuhi kebutuhan debit. Rekomendasi operasi dapat diterjemahkan menjadi matriks atau aturan pengoperasian pada kondisi *non-peak* dan *peak* sehingga keputusan tidak hanya didasarkan pada tercapainya debit, tetapi juga pada konsumsi energi dari sumber, rugi *feeder*, dan biaya listrik total.

Penelitian ini juga membantu pengelola mengkuantifikasi energi dan biaya yang hilang pada kabel *feeder*, mengenali *feeder* atau kondisi operasi yang memberikan kontribusi rugi lebih besar, serta menetapkan *baseline* untuk mengevaluasi hasil perbaikan operasi. Dengan demikian, upaya penghematan dapat diprioritaskan pada perubahan pola operasi yang dapat diterapkan tanpa investasi peralatan baru, sekaligus menjaga pemenuhan debit, keamanan pembebanan motor, dan batas penurunan tegangan.

Luaran prototipe *digital twin* memberikan manfaat praktis berupa tampilan kondisi aktual, ringkasan rugi *feeder*, penurunan tegangan, konsumsi energi, biaya, serta hasil penyaringan dan pemeringkatan kombinasi Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S dalam satu antarmuka, sehingga operator dapat membandingkan pilihan konfigurasi sebelum keputusan operasi diambil.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah ditetapkan agar penelitian tetap fokus, terukur, dan konsisten dengan data operasi lapangan serta metode analisis yang digunakan. Penelitian dibatasi pada evaluasi keterkaitan antara kebutuhan debit, konfigurasi operasi pompa, arus *feeder*, rugi daya dan rugi energi kabel, penurunan tegangan, konsumsi energi sumber, efisiensi operasional kelistrikan, dan biaya listrik pada sistem pemompaan multi-motor tegangan menengah.

1.Objek penelitian adalah sistem pemompaan distribusi air bersih di Instalasi Pengolahan Air Pulogadung, Jakarta Timur, yang terdiri atas sembilan unit motor induksi tiga fasa tegangan menengah yang menggerakkan pompa sentrifugal dengan pengaturan variable speed drive dan kecepatan tetap.

2. Populasi penelitian mencakup unit Pompa 1B sampai dengan 7B serta 1S sampai dengan 2S. Pengukuran langsung dan analisis deret waktu kelistrikan difokuskan pada lima unit, yaitu 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S, sesuai periode operasi dan ketersediaan data masing-masing. Pada *baseline* utama Juni 2026, rekaman Pompa 3B mencakup 16–19 Juni dan rekaman Pompa 2B mencakup 20–24 Juni. Data tambahan 24–26 Juli 2026 digunakan untuk memeriksa keberadaan operasi simultan 2B–3B pada tag yang tersedia, tetapi tidak digunakan sebagai dasar tunggal pembuktian biaya karena status seluruh unit, *interlock*, faktor daya, dan frekuensi VSD tidak lengkap pada interval yang sama. Data arus, tegangan, faktor daya, temperatur kabel, status, dan waktu operasi Pompa 2B diperlakukan sebagai data aktual. Debit individual, *head* individual, dan frekuensi VSD yang belum tersedia lengkap menggunakan model hidraulik terkalibrasi dengan Pompa 3B sebagai referensi awal, sedangkan panjang, impedansi, dan temperatur *feeder* menggunakan data khusus 2B.

3. Data operasi utama dibatasi pada periode 16–24 Juni 2026. Data SCADA tambahan 24–26 Juli 2026 digunakan sebagai verifikasi operasional tambahan, terutama untuk memeriksa pola aktivasi Pompa 2B dan 3B. Data SCADA dan *power meter* memiliki resolusi 1–15 menit. Data diselaraskan menurut timestamp

untuk analisis tren dan integrasi energi, sedangkan nilai asli tetap digunakan untuk titik operasi representatif.

4. Analisis dilakukan dengan pendekatan quasi-steady-state pada setiap interval pengamatan. Fenomena transien kelistrikan, seperti starting motor, inrush current, switching, dan gangguan sistem, serta fenomena transien hidraulik, seperti water hammer dan perubahan tekanan sesaat, tidak dibahas.

5. Kondisi *non-peak* dan *peak* ditetapkan sebagai dua skenario kebutuhan hidraulik representatif berdasarkan data aktual, yaitu debit 3.024 L/s dengan *head* pembanding 15,0 m untuk *non-peak* dan debit 4.712 L/s dengan *head* pembanding 27,0 m untuk *peak*. Konfigurasi aktual masing-masing skenario digunakan sebagai *baseline*. Konfigurasi kandidat dibandingkan pada debit, *head*, durasi, dan periode tarif yang sama sehingga selisih energi dan biaya tidak berasal dari penurunan layanan hidraulik. Istilah LWBP dan WBP digunakan secara terpisah hanya untuk evaluasi biaya berdasarkan skema *time-of-use*.

6. Kelayakan hidraulik dievaluasi berdasarkan data debit dan *head* aktual, kurva karakteristik pompa, kurva sistem, dan hukum afinitas. Basis perbandingan optimasi ditetapkan sebesar 3.024 L/s dan 15,0 m pada kondisi *non-peak* serta 4.712 L/s dan 27,0 m pada kondisi *peak*. Kandidat diterima apabila memenuhi titik kerja tersebut dalam toleransi model dan seluruh batas teknis. Penelitian tidak melakukan simulasi CFD, pemodelan transien jaringan pipa, atau optimasi hidraulik jaringan distribusi secara menyeluruh.

7. Optimasi dilakukan terhadap seluruh 31 kombinasi ON/OFF tidak kosong yang dapat dibentuk dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S. Untuk kombinasi yang memuat unit VSD, faktor utilisasi model VSD dievaluasi dalam rentang terkalibrasi sebagai sub-skenario untuk memenuhi target debit. Penelitian tidak melakukan pencarian global terhadap seluruh kemungkinan kombinasi sembilan pompa dan tidak mengasumsikan redistribusi daya otomatis dari pompa yang tidak aktif kepada pompa yang aktif. Nilai tersebut merupakan variabel model dan tidak ditafsirkan sebagai frekuensi atau putaran aktual karena tag frekuensi VSD kontinu belum tersedia.

8. Rugi daya kabel yang dihitung adalah rugi aktif resistif tiga fasa berdasarkan hubungan $3I^2R\_T$ dengan arus hasil pengukuran. Rugi harmonisa, rugi akibat ketidakseimbangan tegangan, rugi transformator, rugi switchgear, dan rugi internal VSD tidak dipisahkan sebagai komponen analisis tersendiri.

9. Resistansi kabel dikoreksi terhadap temperatur konduktor menggunakan koefisien temperatur tembaga. Temperatur konduktor diperkirakan dari temperatur permukaan kabel dengan penambahan margin 8°C. Penelitian tidak melakukan pengukuran temperatur konduktor secara langsung atau pemodelan termal detail sepanjang lintasan kabel.

10. Penurunan tegangan dianalisis menggunakan resistansi dan reaktansi kabel *feeder* pada kondisi operasi steady-state. Evaluasi dilakukan pada masing-masing *feeder* motor tanpa simulasi aliran daya sistem tenaga secara menyeluruh.

11. Efisiensi yang dihitung adalah efisiensi operasional kelistrikan pada batas sumber-*feeder*-motor, dengan kebutuhan debit pompa sebagai batas kelayakan operasi. Penelitian tidak menentukan efisiensi hidraulik total pompa maupun efisiensi intrinsik motor melalui pengujian laboratorium. Nilai efisiensi motor mengacu pada data *nameplate* atau data teknis yang tersedia.

12. Analisis sensitivitas menggunakan metode one-at-a-time terhadap arus operasi, temperatur konduktor, panjang *feeder*, dan luas penampang kabel. Analisis ini digunakan untuk menguji ketahanan hasil dan mengidentifikasi parameter dominan, bukan untuk pembuktian hipotesis. Variasi panjang dan luas penampang bersifat evaluasi teknis dan tidak diperlakukan sebagai variabel keputusan investasi.

13. Fungsi objektif dibatasi pada minimisasi konsumsi energi aktif dan biaya listrik berdasarkan pemisahan energi pada periode LWBP dan WBP selama periode penelitian. Biaya daya maksimum, penalti faktor daya, pajak, biaya investasi, biaya pemeliharaan, biaya penggantian peralatan, dan analisis kelayakan ekonomi jangka panjang tidak diperhitungkan.

14. Kandidat operasi dinyatakan layak apabila memenuhi target debit, batas arus nominal motor, batas penurunan tegangan, availability unit, dan rentang model

operasi pompa. Kemampuan hantar arus kabel belum digunakan sebagai constraint independen karena data KHA pabrikan dan faktor derating berdasarkan kondisi pemasangan belum tersedia secara lengkap. Verifikasi KHA wajib dilakukan sebelum implementasi lapangan. Kandidat yang melibatkan Pompa 2B menggunakan data kelistrikan aktual dan parameter *feeder* 2B, sedangkan debit individual, *head*, dan titik operasi hidrauliknya merupakan keluaran model terkalibrasi yang mengacu pada karakteristik Pompa 3B sebagai unit sejenis. Rekomendasi yang melibatkan Pompa 2B tetap memerlukan verifikasi melalui *trial operation* sebelum diterapkan. Penelitian tidak membahas desain ulang sistem, penggantian motor atau kabel, penambahan unit pompa, maupun perubahan konfigurasi jaringan pipa.

15. Implementasi *digital twin* dibatasi pada prototipe operasional *offline* berbasis Node-RED dengan pembaruan manual atau berkala melalui antarmuka HTTP, file CSV/historian, atau adaptor data yang sesuai. Aliran data bersifat satu arah dari sistem fisik menuju model digital. Prototipe menghitung kondisi aktual dari tag debit sistem, tegangan, arus, faktor daya, temperatur kabel, status, dan waktu operasi pada Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S sesuai ketersediaan data; membangkitkan serta mengevaluasi 31 kombinasi kelima unit; dan menyajikan rekomendasi pada *dashboard*. Aset Pompa 2B menggunakan data kelistrikan dan *feeder* aktual, sedangkan model hidraulik individualnya mengacu pada kurva terkalibrasi Pompa 3B. Prototipe tidak mengirim perintah start-stop, set-point VSD, atau perubahan posisi valve secara otomatis ke PLC/SCADA.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini disusun untuk menunjukkan keterkaitan yang runtut antara identifikasi masalah, landasan teoretis, metode analisis, hasil penelitian, dan rekomendasi operasional. Susunan tesis terdiri atas lima bab sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab ini menguraikan karakteristik motor tegangan menengah dengan beban dinamis, penggunaan penggerak

VSD dan *fixed-speed* pada sistem pemompaan, kondisi aktual sistem pemompaan IPA Pulogadung, serta urgensi optimalisasi operasi dengan memperhitungkan rugi daya dan rugi energi pada kabel *feeder* terhadap konsumsi energi dan biaya operasional. Bab ini juga menempatkan prototipe *digital twin* operasional sebagai bentuk implementasi model dan sarana pendukung keputusan operator.

BAB II Tinjauan Pustaka memuat landasan teoretis mengenai motor induksi tegangan menengah pada beban dinamis, pengoperasian menggunakan *variable speed drive* dan *fixed-speed*, karakteristik pompa sentrifugal dan operasi paralel, kesetaraan unit sejenis, sistem suplai serta kabel *feeder* tegangan menengah, resistansi, rugi daya, rugi energi, penurunan tegangan, dan efisiensi operasional pada batas sumber-*feeder*-motor. Bab ini juga membahas optimasi energi dan biaya melalui enumerasi kombinasi unit, analisis sensitivitas parameter operasi dan kabel, penelitian terdahulu, research gap, kebaruan, dan hipotesis penelitian. Konsep *digital twin*, tingkat kematangan, arsitektur, sinkronisasi data, simulasi *what-if*, dan *human-in-the-loop* dibahas sebagai dasar implementasi prototipe.

BAB III Metode Penelitian menjelaskan pendekatan kuantitatif berbasis studi kasus rekayasa, objek dan unit analisis, lokasi penelitian, sumber data, klasifikasi kondisi *non-peak* dan *peak*, serta variabel penelitian. Bab ini memuat tahapan pengolahan data, pemodelan hidraulik, verifikasi parameter motor dan kabel, perhitungan resistansi aktual, rugi daya dan rugi energi *feeder* berbasis titik operasi dan deret waktu, analisis penurunan tegangan, arus motor, dan efisiensi operasional. Selanjutnya dijelaskan pembentukan 31 kombinasi struktural dari Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S, evaluasi sub-skenario VSD, optimasi enumeratif energi dan biaya berbasis tarif *time-of-use*, pengujian hipotesis, validasi model terhadap data pengukuran, serta perancangan prototipe *digital twin* operasional.

BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan menyajikan data aktual dan klasifikasi operasi sistem pemompaan, verifikasi parameter teknis motor dan kabel *feeder*, hasil perhitungan resistansi aktual, rugi daya dan rugi energi kabel, penurunan tegangan, arus motor, serta efisiensi operasional. Bab ini membahas pembangkitan, penyaringan, dan pemeringkatan 31 kombinasi Pompa 1B, 2B, 3B, 4B, dan 2S untuk kondisi *non-*

peak dan *peak*, hasil optimasi energi dan biaya, analisis sensitivitas, pembuktian hipotesis utama, validasi model terhadap data pengukuran, implikasi teknis hasil penelitian, dan rekomendasi operasional. Implementasi prototipe *digital twin* disajikan melalui arsitektur, keluaran mesin perhitungan, tampilan *dashboard*, dan contoh rekomendasi konfigurasi.

BAB V Kesimpulan dan Saran memuat kesimpulan yang disusun berdasarkan hasil analisis untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian. Bab ini juga memuat saran operasional bagi pengelola sistem pemompaan IPA Pulogadung serta saran pengembangan penelitian selanjutnya. Bab ini juga menjelaskan status prototipe *digital twin* dan tahapan pengembangannya menuju integrasi SCADA langsung.

DAFTAR PUSTAKA

Anders, G. J. (1997). *Rating of electric power cables: Ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications*. IEEE Press.

Azab, M. (2025). A review of recent trends in high-efficiency induction motor drives. *Vehicles, 7*(1), Article 15. https://doi.org/10.3390/vehicles7010015

Boldea, I. (2016). *Electric machines: Steady state, transients, and design with MATLAB* (3rd ed.). CRC Press.

Cantu-Funes, R., & Coelho, L. C. (2023). Simulation-based optimization of pump scheduling for drinking water distribution systems. *Engineering Optimization, 55*(5), 841–855. https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2044030

Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill.

de Souza, D. F., da Guarda, E. L. A., Sauer, I. L., & Tatizawa, H. (2021). Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings. *Energies, 14*(21), Article 7152. https://doi.org/10.3390/en14217152

Feng, F., Liu, Z., Shi, G., & Mo, Y. (2024). An effective digital twin modeling method for infrastructure: Application to smart pumping stations. *Buildings, 14*(4), Article 863. https://doi.org/10.3390/buildings14040863

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access, 8*, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Gan, X., Pei, J., Pavesi, G., Yuan, S., & Wang, W. (2022). Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. *Energy Reports, 8*, 11592–11606. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.016

Gao, Q., Xue, J., & Yan, H. (2022). Optimization analysis of full life cycle energy efficiency multi-objective parallel pump sets. *IEEE Access, 10*, 105578–105588. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3209381

Goman, V., Prakht, V., Kazakbaev, V., & Dmitrievskii, V. (2020). Comparative study of induction motors of IE2, IE3 and IE4 efficiency classes in pump applications taking into account CO2 emission intensity. *Applied Sciences, 10*(23), Article 8536. https://doi.org/10.3390/app10238536

Gülich, J. F. (2020). *Centrifugal pumps* (4th ed.). Springer.

Hu, S., Gao, J., Zhong, D., Wu, R., & Liu, L. (2023). Real-time scheduling of pumps in water distribution systems based on exploration-enhanced deep reinforcement learning. *Systems, 11*(2), Article 56. https://doi.org/10.3390/systems11020056

Hua, C., Xu, M., Mou, J., Wang, J., Zhou, P., & Yang, X. (2023). System control methods for energy efficiency improvement of parallel pump systems: A review. *International Journal of Fluid Machinery and Systems, 16*(3), 367–383. https://doi.org/10.5293/IJFMS.2023.16.3.367

Hydraulic Institute. (2011). *American national standard for rotodynamic pumps for hydraulic performance acceptance tests* (ANSI/HI 14.6-2011).

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). *IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators* (IEEE Std 112-2017).

International Electrotechnical Commission. (2004). *Conductors of insulated cables* (IEC 60228).

International Electrotechnical Commission. (2014a). *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations* (IEC 60287-1-1).

International Electrotechnical Commission. (2014b). *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV up to 30 kV* (IEC 60502-2).

International Electrotechnical Commission. (2015). *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance* (IEC 60287-2-1).

International Energy Agency. (2025a). *Energy efficiency 2025*.

International Energy Agency. (2025b). *Energy efficiency policy toolkit 2025: Industry*.

International Organization for Standardization. (2012). *Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1, 2 and 3* (ISO 9906:2012).

International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles* (ISO 23247-1:2021).

Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2017). *Pump handbook* (4th ed.). McGraw-Hill.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. D. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.

Menke, R., Abraham, E., Parpas, P., & Stoianov, I. (2016). Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling. *Applied Energy, 170*, 377–387. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.136

Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dmitrievskii, V. (2021a). Improving reliability and energy efficiency of three parallel pumps by selecting trade-off

operating points. *Mathematics, 9*(11), Article 1297. https://doi.org/10.3390/math9111297

Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dmitrievskii, V. (2021b). Increasing service life and system efficiency of parallel pumps using combined pump regulation. *Water, 13*(13), Article 1808. https://doi.org/10.3390/w13131808

Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V., & Gevorkov, L. (2020). Energy consumption comparison of a single variable-speed pump and a system of two pumps: Variable-speed and fixed-speed. *Applied Sciences, 10*(24), Article 8820. https://doi.org/10.3390/app10248820

PAM JAYA. (2026). *Data teknis dan operasional Instalasi Pengolahan Air Pulogadung* [Dokumen internal].

Paramonov, A., Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dmitrievskii, V. (2023). Investigation of the effect of the voltage drop and cable length on the success of starting the line-start permanent magnet motor in the drive of a centrifugal pump unit. *Mathematics, 11*(3), Article 646. https://doi.org/10.3390/math11030646

PT Supreme Cable Manufacturing & Commerce Tbk. (t.t.). *Katalog medium voltage cable (N2XSY dan tipe multi-core)*.

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access, 8*, 21980–22012. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143

Rozegnał, B., Albrechtowicz, P., Mamcarz, D., Rerak, M., & Skaza, M. (2021). The power losses in cable lines supplying nonlinear loads. *Energies, 14*(5), Article 1374. https://doi.org/10.3390/en14051374

Tang, Y., Huang, X., Zhou, Y., & Chen, G. (2021). Research on temperature monitoring method of cable on 10 kV railway power transmission lines based on distributed temperature sensor. *Energies, 14*(12), Article 3705. https://doi.org/10.3390/en14123705

United Nations Industrial Development Organization. (2020). *Efficiency solutions for motor-driven systems*.

U.S. Department of Energy. (2024a). *Pump systems*.

U.S. Department of Energy. (2024b). *Pumping system assessment tool*.

Volk, M. (2013). *Pump characteristics and applications* (3rd ed.). CRC Press.

White, F. M. (2011). *Fluid mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill.

Yang, L., Qiu, W., Huang, J., Hao, Y., Fu, M., Hou, S., & Li, L. (2018). Comparison of conductor-temperature calculations based on different radial-position-temperature detections for high-voltage power cable. *Energies, 11*(1), Article 117. https://doi.org/10.3390/en11010117

Zhang, Y., Yu, F., Ma, Z., Li, J., Qian, J., Liang, X., Zhang, J., & Zhang, M. (2022). Conductor temperature monitoring of high-voltage cables based on electromagnetic-thermal coupling temperature analysis. *Energies, 15*(2), Article 525. https://doi.org/10.3390/en15020525