

Optimasi Histeresis *Smart Relay* Zelio pada Sistem Pompa *Booster* untuk Peningkatan Efisiensi Energi dan Kualitas Kinerja *Cycling*

Agi Tama^{1,2}, Karel Octavianus Bachri³, Joko Tri Susilo⁴, Erik Agustian Yulanda⁵, Bambang Iwan Suryana⁶

¹Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur (PSPPI), Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya,
Jl. Jend. Sudirman No.51 5, RT.004/RW.4, Kecamatan Setiabudi, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta

^{2,4,5,6}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang,
Jl. Witana Harja No.18b, Pamulang Bar. Kec. Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten 15417
Email: dosen02635@unpam.ac.id, dosen02659@unpam.ac.id, dosen02636@unpam.ac.id, dosen02654@unpam.ac.id,

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jl. Jend. Sudirman No.51 5, RT.004/RW.4, Kecamatan Setiabudi, Kota Jakarta Selatan, Indonesia
Email: karel.bachri@atmajaya.ac.id,

ABSTRAK

Stabilitas tekanan distribusi air bersih merupakan tantangan krusial dalam pengelolaan infrastruktur gedung bertingkat, di mana tekanan seringkali jatuh di bawah ambang batas operasional 2 bar. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kendali pompa *booster* yang optimal untuk mengatasi inefisiensi energi dan ketidakstabilan tersebut. Metode yang diterapkan adalah perancangan panel kontrol dengan sistem *jogging* tiga pompa yang dikendalikan oleh *Smart Relay* Zelio dan sensor *Pressure Switch* Digital. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan optimasi histeresis sebesar 1 bar pada sistem Zelio tiga pompa yang belum pernah diuji sebelumnya, guna meminimalkan frekuensi *cycling* dan mencegah fenomena *chattering*. Berdasarkan pengujian komparatif selama 9 jam, sistem yang diusulkan berhasil menurunkan konsumsi energi total dari 48,97 kWh (sistem konvensional) menjadi 32,88 kWh. Hal ini setara dengan penghematan energi sebesar 32,86%. Selain efisiensi, sistem ini terbukti menyeimbangkan beban kerja antar pompa secara otomatis melalui algoritma *jogging*. Kontribusi penelitian ini adalah penyediaan strategi kendali otomatis berbasis *Smart Relay* yang terbukti handal, stabil, dan hemat energi untuk manajemen utilitas bangunan modern.

Kata Kunci: Efisiensi Energi; Histeresis; Pompa *Booster*; *Smart Relay* Zelio; Sistem *Jogging*.

ABSTRACT

Maintaining stable clean water pressure is a crucial challenge in building infrastructure management, especially to ensure adequate distribution to the uppermost floors. In many plumbing installations, water pressure issues are frequently observed below the minimum operational threshold of 2 Bar, particularly on upper levels, resulting in low, insufficient water flow for occupants. To address this water distribution performance issue, this study focuses on the development and implementation of an optimized booster pump control panel system designed to guarantee stable pressure and enhance operational efficiency. The research methodology involves implementing a panel with a three-pump jogging system controlled by a Zelio Smart Relay as the main control unit, utilizing a Digital Pressure Switch as the input sensor. The key optimization lies in applying Hysteresis Optimization within the Zelio logic to minimize pump cycling frequency and improve the system's energy efficiency. Comparative testing results indicate that the designed and tested panel effectively addresses low-pressure problems. Based on comparative analysis, the hysteresis-optimized jogging system demonstrated a significant increase in effectiveness, achieving energy savings of up to 32.9% compared to a standard pump panel without a jogging system (single-pump control or no sequencing).

Keywords: Hysteresis, Optimization, Zelio Smart Relay, Booster Pump, Pump Jogging, Energy Efficiency.

Pendahuluan

Stabilitas tekanan distribusi air bersih merupakan aspek fundamental dalam manajemen utilitas gedung bertingkat guna menjamin kenyamanan penghuni serta menjaga umur operasional peralatan mekanikal. Pada gedung tinggi, fluktuasi tekanan air adalah fenomena yang tak terhindarkan akibat variasi beban pemakaian yang dinamis, di mana tekanan kerap jatuh di bawah ambang batas operasional ideal sehingga memicu kavitasi dan water hammer pada instalasi perpipaan [1], [2]. Oleh karena itu, strategi manajemen energi yang efisien menjadi sangat krusial, mengingat sistem pompa merupakan salah satu

Kendati demikian, sistem booster konvensional yang masih mengandalkan pressure switch mekanis seringkali gagal memenuhi standar efisiensi tersebut karena keterbatasan presisi alat. Kelemahan utama sistem ini adalah tingginya frekuensi cycling (siklus mati-hidup pompa) yang terjadi dalam interval singkat, yang secara teknis memicu lonjakan arus asut (inrush current) dan distorsi harmonisa yang merusak motor listrik [5], [6]. Tanpa kendali histeresis yang terukur, sistem sangat rentan mengalami osilasi mode-saklar (mode-switch oscillations) yang mengakibatkan operasional pompa menjadi tidak stabil dan boros energi [7], [8]. Permasalahan ini semakin kompleks pada konfigurasi pompa paralel, di mana ketidaksinkronan beban seringkali justru menurunkan efisiensi volumetrik dan memperbesar kerugian energi sistem [9], [10].

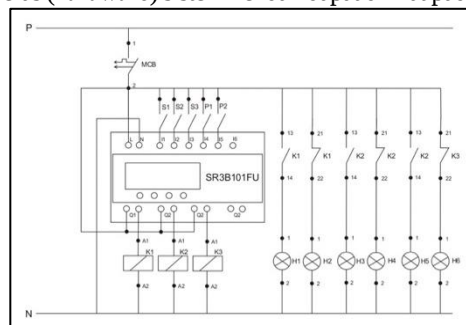
Meskipun otomatisasi telah diterapkan secara luas, penelusuran literatur menunjukkan adanya celah penelitian (research gap) terkait optimasi parameter histeresis yang spesifik. Mayoritas studi yang ada saat ini lebih berfokus pada logika pergantian (alternating) antar pompa, namun kurang mendalami pengaruh variasi diameter pipa dan karakteristik aliran paralel terhadap respons histeresis itu sendiri [19], [20], [21]. Padahal, studi karakteristik turbin pompa terbaru menegaskan bahwa pengaturan histeresis adalah kunci stabilitas di wilayah operasi kritis untuk mencegah chattering [22]. Tanpa strategi kendali adaptif yang mempertimbangkan batasan siklus kerja, sistem kendali cerdas sekalipun belum tentu menghasilkan efisiensi energi yang optimal [23], [24], [25].

Metode Penelitian

Tempat dan Waktu Penelitian

[illegible]

Perancangan Sistem Kendali

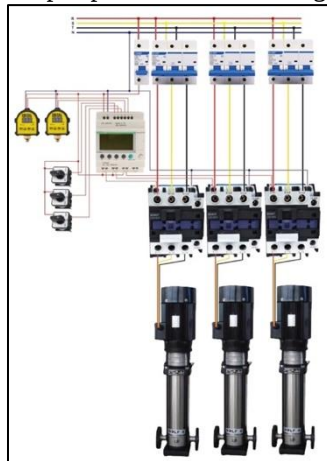


Gambar 1. Single Line Diagram Kontrol Panel Pompa Booster

Logika pemrograman dibuat menggunakan *software Zelio Soft 2* dengan metode *Ladder Diagram*. Algoritma utama yang diterapkan adalah sistem *jogging* (pergantian kerja pompa secara bergilir) untuk menyeimbangkan jam kerja (*running hours*) ketiga pompa *booster*. Algoritma pengendalian sistem dirancang dengan urutan logika sebagai berikut.

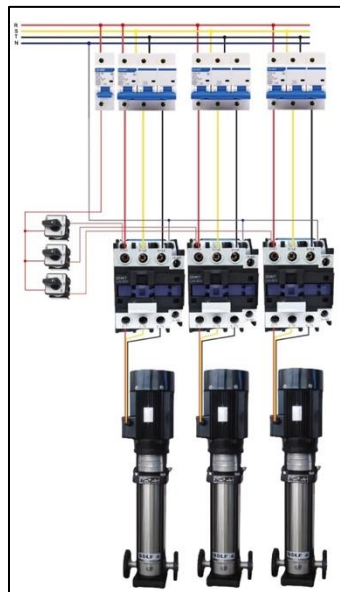
1. **Inisialisasi:** Smart Relay membaca input dari sensor *pressure switch* secara *real-time*.
2. **Deteksi Tekanan Rendah:** Jika tekanan terukur di bawah *set-point* (2 bar), sistem mengaktifkan *timer on-delay* untuk mencegah *chattering*.
3. **Eksekusi Pompa (Jogging):** Setelah tunda waktu terpenuhi, sistem mengaktifkan pompa secara bergantian (*jogging*) berdasarkan jam kerja operasi untuk menyeimbangkan *lifetime* pompa.
4. **Cut-Off:** Jika tekanan mencapai batas atas (3 bar), sistem mematikan seluruh pompa."

Sistem kontrol menggunakan dua mode operasi, yakni mode Otomatis dan Manual. Pada mode Otomatis, pompa *booster* dikendalikan secara otomatis dari *pressure switch* berdasarkan dua *setpoint* tekanan yang sudah ditetapkan. Sementara itu dalam mode Manual, pengendalian ON dan OFF pada pompa tetap dilakukan oleh *pressure switch* setelah *selector switch* memposisikan *selector* pada mode manual maka pompa akan ON sesuai dengan yang dipilih.



Gambar 2. Skema Rangkaian Mode Otomatis

Pada mode operasi otomatis, pengontrolan pompa *booster* sepenuhnya dilakukan oleh *Smart Relay Zelio Logic SR2B121FU* (Schneider). Kontroler ini menerima sinyal berupa masukan dari dua *pressure switch* (PS1 dan PS2). *Pressure Switch 1* (PS1) memberikan perintah untuk mengaktifkan operasi pompa secara bergantian (*lead-lag rotation*). Sementara itu, *Pressure Switch 2* (PS2) berfungsi untuk mengaktifkan seluruh pompa secara bersamaan (*simultaneous operation*) ketika tekanan instalasi mencapai titik kritis.



Gambar 3. Skema Rangkaian Mode Manual

Rangkaian mode manual ini digunakan apabila pada *Zelio Logic* terjadi *Trouble*, mode manual ini berfungsi dengan memposisikan *Selector switch* pada posisi manual maka pompa *booster* akan bekerja sesuai dengan *Selector switch* yang dipilih.

Penerapan Hysteresis

Untuk mengatasi masalah *chattering* (pompa hidup-mati terlalu cepat), penelitian ini menerapkan teknik hysteresis pada blok komparator analog. Hysteresis berfungsi menciptakan area ambang batas (*deadband*) sebesar 1 bar di antara titik *cut-in* (3 bar) dan *cut-out* (4 bar).

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara statistik dan komparatif:

1. Analisis Efisiensi Energi: Membandingkan total konsumsi energi (kWh) pada Skenario 1, 2, dan 3 untuk menentukan nilai hysteresis yang memberikan penghematan energi tertinggi.
2. Analisis Kualitas *Cycling*: Membandingkan frekuensi *cycling* pada Skenario 1, 2, dan 3. Nilai hysteresis yang optimal adalah yang menghasilkan frekuensi *cycling* terendah (memperpanjang interval waktu antara ON dan OFF pompa), sehingga dapat meningkatkan umur pakai (Life Cycle) komponen mekanik dan elektrik.
3. Kesimpulan Optimasi: Menetapkan nilai hysteresis ΔP yang memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi yang tinggi dan frekuensi *cycling* yang rendah.

Rancangan Sistem Eksperimen

Sistem eksperimen dirancang menggunakan unit panel pompa *booster* yang telah dibuat sebelumnya dengan spesifikasi 3 (tiga) pompa yang bergerak bergantian. Komponen utama yang digunakan adalah:

1. Pengontrol (Controller): *Smart Relay Zelio Logic SR2B121FU*.
2. Sensor Masukan (Input Sensor): Dua unit *Pressure Switch* digital untuk mendeteksi batas tekanan bawah dan batas tekanan atas sistem.
3. Aktuator: Tiga unit motor pompa (disimulasikan atau aktual) yang diatur melalui kontaktor dan sistem *jogging* (pergantian otomatis).

Variabel Eksperimen:

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*): Pengaturan nilai Hysteresis terletak pada Tekanan *Pressure Switch* yang diimplementasikan dalam pemrograman *Smart Relay*. Hysteresis didefinisikan sebagai selisih antara titik *cut-out* (tekanan pompa OFF) dan titik *cut-in* (tekanan pompa ON).
2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*):
 - a. Efisiensi Energi Listrik: Diukur dalam kilowatt-jam (kWh).
 - b. Kualitas Kinerja *Cycling* (Frekuensi ON/OFF): Diukur dalam jumlah *cycling* pompa per periode waktu tertentu.

Prosedur Optimasi Hysteresis

Optimasi dilakukan melalui pengujian dengan memvariasikan nilai hysteresis pada tiga skenario utama, sementara tekanan target (misalnya, $P_{\max} = 3$ bar) dijaga konstan.

Tabel 1. Mekanisme Kerja: Hysteresis Zelio pada Kualitas Kinerja *Cycling*

Tahap Operasi	Parameter Input (Tekanan Air)	Aksi <i>Smart Relay Zelio</i> (Output)	Dampak pada Kualitas Kinerja <i>Cycling</i>
Aktivasi Pompa (Cut-In)	Tekanan (P) turun hingga $P \leq 2$ bar (Batas Bawah Hysteresis)	Zelio Menerima input PS ON, mengaktifkan Pompa 1 (atau memulai siklus <i>jogging</i> ke Pompa berikutnya).	Memastikan pompa hanya Start saat tekanan sistem kritis. Mengawali siklus <i>cycling</i> secara teratur.
Deaktivasi Pompa (Cut-Out)	Tekanan (P) naik hingga $P \geq 3$ Bar (Batas Atas Hysteresis)	Zelio Menerima input PS OFF, mematikan pompa yang beroperasi.	Memastikan pompa hanya Stop setelah tekanan sistem kembali stabil. Mengakhiri siklus <i>cycling</i> .
Periode Hysteresis	$2 \text{ bar} < P < 3 \text{ bar}$	Zelio menahan status terakhir (tetap ON atau tetap OFF) dan mengabaikan fluktuasi tekanan kecil.	Hysteresis 1 bar ini adalah kunci optimasi <i>cycling</i> . Ia mencegah fenomena <i>chattering</i> (ON/OFF cepat) dan menjamin pompa bekerja efisien.
Kinerja Multi-Pompa (Simultan)	$P \leq 1,5$ bar (Batas Kritis PS2)	Zelio Menerima input PS 2 ON, mengaktifkan dua	Meningkatkan keandalan kinerja (<i>redundancy</i>) dengan <i>cycling</i> simultan saat debit air sangat

pompa (atau lebih) secara simultan. tinggi, memastikan tekanan tidak pernah jatuh di bawah ambang batas bahaya.

Pengujian Kinerja dan Pengambilan Data

Pada setiap skenario histeresis, dilakukan pengambilan data kuantitatif secara real-time:

- Pengukuran Efisiensi Energi:** Dilakukan menggunakan **Digital Power Meter Schneider Electric PM2200** yang terintegrasi pada panel. Instrumen ini memiliki akurasi Kelas 0.5S untuk merekam parameter kelistrikan dan akumulasi energi aktif (kWh) secara *real-time* guna memvalidasi penghematan energi dari sistem yang diusulkan.
- Pengukuran Frekuensi *Cycling*: Menggunakan *counter* yang terintegrasi dalam *Zelio Logic* untuk menghitung jumlah total siklus ON-OFF (*start-stop*) pompa (untuk setiap pompa dan total sistem) selama periode pengujian.

Pada rangkaian utama menggunakan *switching* utama Magnetik kontaktor sesuai dengan amper dan kapasitas pompa yang digunakan. Kontaktor yang digunakan sebanyak tiga unit kontaktor yang dikendalikan dengan *Smart relay Zelio Logic SR2B121FU* sebagai kontroler utama. *Zelio logic* mendapat sensing input melalui *pressure switch* 1, 2 dan juga selektor *switch*. Pompa 1, 2 dan 3 hidup secara bergantian sebanyak 2 pompa apabila tekanan air dibawah setpoint 1 dan pompa bekerja secara bersamaan apabila tekanan pada instalasi air dibawah setpoint 2 yang diinput.

Tabel 2. Logic Panel Pompa Booster

Logic Pompa Booster Dengan Pressure Switch						
No	PS 1	PS 2	Pompa 1	Pompa 2	Pompa 3	Logic
1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	I
2	ON	OFF	ON	ON	OFF	II
3	ON	OFF	OFF	ON	ON	III
4	ON	OFF	ON	OFF	ON	IV
5	ON	ON	ON	ON	ON	V

Keterangan Tabel 2

PS 1 : Pressure switch 1

PS 2 : Pressure switch 2

POMPA 1: Pompa Booster No 1

POMPA 2: Pompa Booster No 2

POMPA 3: Pompa Booster No 3

LOGIC : Sequencing Program pada Zelio Logic

Hasil Dan Pembahasan

Hasil Rancangan Panel Pompa Booster

Bagian Hasil dan Pembahasan ini didedikasikan untuk menyajikan temuan empiris yang diperoleh dari penelitian Optimasi Histeresis *Smart Relay Zelio* pada sistem pompa *booster*. Analisis ini berfokus pada validasi kapabilitas sistem dalam mencapai Kualitas Kinerja *Cycling* yang optimal dan membuktikan adanya Peningkatan Efisiensi Energi. Pembahasan akan diuraikan melalui tiga tahapan:

- validasi fungsional sistem kontrol otomatis,
- analisis mekanisme histeresis *Zelio* dalam meminimalisir *cycling* pompa, dan
- komparasi kuantitatif konsumsi energi terhadap metode kontrol konvensional. Secara esensial, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi histeresis yang terintegrasi dalam *Zelio Logic* berhasil mereduksi frekuensi *start/stop* pompa secara signifikan, yang secara langsung menghasilkan peningkatan efisiensi energi listrik dan stabilitas tekanan sistem.

Tabel 3. Analisis Kuantitatif Efisiensi Energi Akibat Optimasi Histeresis

No.	Parameter Pengujian	Metode Kontrol	Konsumsi Energi Total (kWh/9 Jam)	Selisih Penghematan (kWh)	Persentase Penghematan (%)
1	Energi Listrik (E)	Konvensional (ON/OFF Simultan)	48,97	–	–

2	Energi Listrik (E)	Optimasi Zelio (Histeresis & Cycling)	32,88	16,09	32,86%
3	Histeresis (Tekanan Diferensial Optimal)	Setelan Pressure Switch PS 1	$\Delta P = 1$ bar	N/A	N/A
4	Histeresis (Batas Kritis)	Setelan Pressure Switch PS 2	$\Delta P = 0,5$ Bar	N/A	N/A

Tabel 3 menampilkan hasil komparasi data konsumsi energi antara dua skema metode kontrol yang diterapkan pada sistem pompa *booster*. Hasil pengujian yang dilaksanakan selama periode 9 jam kerja menunjukkan kontras signifikan antara performa konsumsi energi metode kontrol konvensional (ON/OFF Simultan) dengan Sistem Optimasi yang diimplementasikan berbasis *Smart Relay Zelio* melalui penerapan jogging dan histeresis. Konsumsi energi sistem konvensional tercatat sebesar 48,97 kWh, sementara Sistem Optimasi hanya mencatat 32,88 kWh. Perbedaan ini menghasilkan penghematan energi aktual sebesar 16,09 kWh atau persentase penghematan energi mencapai 32,86 %. Penghematan energi yang tinggi ini merupakan bukti langsung dari keberhasilan Optimasi Histeresis pada sistem. Dengan pengaturan histeresis optimal sebesar $\Delta P = 1$ bar (selisih antara Cut-Out 3 bar dan Cut-In 2 bar), frekuensi *cycling* (Start/Stop) pompa dapat diminimalisir. Pengurangan *cycling* ini secara signifikan menekan lonjakan arus listrik saat starting motor, yang merupakan penyumbang terbesar inefisiensi, sehingga terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi secara substansial.

Capaian efisiensi sebesar 32,86% ini melampaui hasil studi terdahulu yang dilakukan oleh Pratomo, dkk. [12], yang hanya berfokus pada fungsi kendali logika dasar tanpa optimasi parameter histeresis spesifik. Jika dibandingkan dengan penelitian Olabisi, dkk. [20] yang menerapkan kendali PLC standar, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini menunjukkan keunggulan lebih dalam hal reduksi *inrush current*. Hal ini mengonfirmasi bahwa penggunaan *Smart Relay Zelio* yang dikombinasikan dengan algoritma histeresis 1 bar tidak hanya sekadar mengotomatisasi proses, tetapi secara efektif menghilangkan inefisiensi akibat *cycling* berlebih yang sering luput pada desain panel kendali pompa otomatis konvensional.

Tabel 4. Mekanisme Operasional Histeresis Zelio dan Kualitas Kinerja Cycling

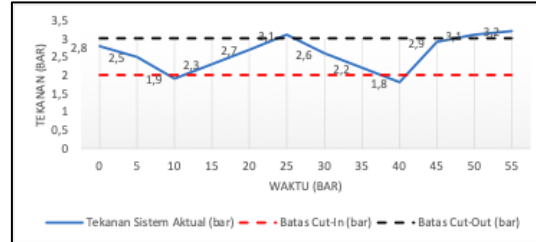
No.	Tahap Operasi	Parameter Kontrol Histeresis	Logika Kontrol <i>Smart Relay Zelio</i>	Peningkatan Kualitas Kinerja Cycling
1	Kondisi Start (Cut-In)	Tekanan Sistem ($P \leq 2$ bar)	Menerima Sinyal ON dari <i>Pressure Switch</i> (PS). Mengaktifkan Pompa Sesuai Jadwal <i>Cycling</i> (Bergantian).	Memastikan <i>Cycling</i> dimulai hanya pada kondisi kritis, menjaga tekanan minimum instalasi.
2	Kondisi STOP (Cut-Out)	Tekanan Sistem ($P \geq 3$ bar)	Menerima Sinyal OFF dari <i>Pressure Switch</i> (PS). Mematikan Pompa yang Beroperasi.	Memastikan <i>Cycling</i> dihentikan setelah tekanan sistem mencapai nilai optimal yang stabil.
3	Periode Histeresis	$2 \text{ bar} < P < 3 \text{ bar}$ ($\Delta P = 1$ bar)	Mempertahankan status terakhir (tetap ON atau OFF) dan mengabaikan fluktuasi minor.	Optimasi Kunci: Mencegah chattering (ON/OFF cepat) dan mengurangi frekuensi <i>cycling</i> , berimplikasi langsung pada efisiensi energi.
4	Kondisi Puncak (Simultan)	$P \leq 1,5$ bar	Mengaktifkan dua atau lebih Pompa secara Simultan (Sistem Jogging Simultan).	Menjamin kinerja andal saat permintaan debit air sangat tinggi, mempertahankan tekanan di atas batas terendah.

Tabel 4 menyajikan uraian operasional mekanisme kontrol yang diimplementasikan oleh *Smart Relay Zelio* SR2B121FU dalam mengelola Kualitas Kinerja *Cycling* pada pompa *booster* melalui input histeresis.

Kunci dari peningkatan Kualitas Kinerja *Cycling* adalah kemampuan sistem untuk menjaga stabilitas tekanan tanpa memicu *cycling* berlebihan, yang dikenal sebagai chattering. Zelio Logic secara efektif mengintegrasikan zona histeresis dari *pressure switch* untuk mencapai kondisi ini:

1. Aktivasi dan Deaktivasi: Aktivasi (Start) pompa dipicu hanya ketika tekanan sistem turun hingga batas bawah 2 bar, sementara Deaktivasi (Stop) dilakukan saat tekanan mencapai batas atas 3 bar. Regulasi ketat ini mencegah Start/Stop yang disebabkan oleh fluktuasi tekanan minor.

2. Peran Utama Histeresis ($\Delta P = 1$ bar): Rentang 1 bar (antara 2 dan 3 bar) ditetapkan sebagai zona histeresis. Dalam rentang ini, Zelio diprogram untuk mengabaikan sinyal fluktuasi dan mempertahankan status kerja terakhir pompa. Mekanisme ini merupakan inti dari optimasi karena secara signifikan mereduksi frekuensi Start/Stop motor, yang tidak hanya berkontribusi pada penghematan energi (seperti dibuktikan pada Tabel 1) tetapi juga memperpanjang masa pakai komponen mekanis.
3. Kinerja Simultan: Logika Zelio juga mencakup mode darurat untuk permintaan debit air sangat tinggi (tekanan 1,5 bar). Dalam kondisi ini, Zelio mengaktifkan sistem jogging secara simultan (multi-pompa), menjamin pasokan air terpenuhi tanpa mengorbankan stabilitas tekanan sistem.



Gambar 4. Karakteristik Respon Tekanan dan Histeresis Sistem pada Mode Otomatis

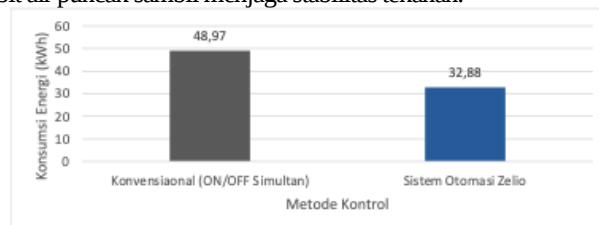
Berdasarkan visualisasi di **Gambar 4**, dapat dilihat bahwa sistem kontrol baru ini berhasil membuat tekanan stabil di antara 2 dan 3 berkat pengaturan **1**. Kestabilan ini sangat penting karena mencegah pompa beroperasi berlebihan (*cycling*). Pola kerja yang rapi dan terkendali ini adalah faktor utama di balik hasil penghematan energi yang signifikan, yang angkanya dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Pengujian kinerja panel secara otomatis

No	Tekanan(bar)	PS 1	PS 2	Pompa 1	Pompa 2	Pompa 3	Logic
1	2,1 – 3,1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	I
2	2,0 – 3,0	ON	OFF	ON	ON	OFF	II
3	2,1 – 2,9	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	I
4	2,0 – 3,0	ON	OFF	OFF	ON	ON	III
5	2,0 – 3,0	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	I
6	2,0 – 3,0	ON	OFF	ON	OFF	ON	IV
7	2,1 – 3,0	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	I
8	1,5 – 2,0	ON	OFF	ON	ON	OFF	II
9	1,5 – 2,0	ON	ON	ON	ON	ON	V
10	2,0 – 3,0	ON	OFF	ON	OFF	ON	II

Tabel 5 Pengujian menunjukkan Zelio berhasil mengintegrasikan input tekanan dari *Pressure Switch* (PS) untuk menjalankan lima skenario logika (*Logic I* hingga *V*).

1. Histeresis dan *Cycling* Normal: Ketika tekanan berada pada rentang 2,0-3,0 bar (dipicu oleh PS 1 ON), Zelio secara konsisten menjalankan pompa secara bergantian (*Logic II, III, dan IV*). Hal ini memvalidasi bahwa hysteresis $\Delta P = 1$ bar berfungsi untuk mengontrol *cycling* dan menjamin distribusi beban kerja pompa yang adil.
2. Pencegahan *Chattering*: Pada kondisi *standby* (*Logic I*), ketika tekanan berada di zona aman histeresis (2,1-3,1 bar), semua PS berada dalam kondisi OFF dan semua pompa tetap OFF. Kondisi ini mengkonfirmasi keberhasilan Zelio dalam mengabaikan fluktuasi tekanan minor, yang secara efektif mencegah *chattering* dan meningkatkan keandalan sistem.
3. Kinerja Kritis Simultan: Pada Baris 9, kondisi tekanan sangat rendah (1,5-2,0 bar) secara otomatis mengaktifkan PS 2 dan memicu *Logic V*. Logika ini menjalankan semua pompa secara serentak, membuktikan kemampuan sistem untuk merespons permintaan debit air puncak sambil menjaga stabilitas tekanan.



Gambar 5. Perbandingan Efisiensi Konsumsi Energi

Analisis efisiensi energi yang divisualisasikan pada **Gambar 5** menunjukkan disparitas yang signifikan antara konsumsi energi kontrol konvensional dan sistem optimasi berbasis Zelio. Grafik batang tersebut memvalidasi bahwa sistem yang diimplementasikan berhasil mengurangi beban listrik dari 48,97 kWh menjadi 32,88 kWh selama periode pengujian. Peningkatan ini membuktikan bahwa strategi optimasi histeresis telah

mencapai tujuan utamanya dengan menghasilkan efisiensi energi sebesar 32,86 %. Hasil ini diperkuat oleh temuan **Gambar 4** yang menunjukkan pola *cycling* terkontrol, memposisikan reduksi frekuensi *start* motor sebagai faktor dominan dalam pencapaian efisiensi kuantitatif yang tersaji pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Pengujian Daya Motor Pompa Booster

No	Waktu Pengukuran	Pengukuran Energi Listrik Tanpa Sistem Jogging (Kwh)	Pengukuran Energi Listrik Dengan Sistem Jogging (Kwh)
1	09.00	3.47	2.33
	10.00	8.35	5.59
	11.00	13.55	9.08
	12.00	18.76	12.57
	13.00	23.96	16.06
	14.00	29.16	19.55
	15.00	34.37	23.03
	16.00	39.57	26.52
	17.00	44.45	29.79
	18.00	48.79	32.70
Jumlah		48.79	32.70

Tabel 6. Pengujian fungsionalitas dan efektivitas energi dilakukan pada rancangan panel kontrol pompa *booster* otomatis, yang berfokus pada optimasi Histeresis (Differential Pressure) yang diprogram pada *Smart Relay* Zelio. Perancangan panel ini mengintegrasikan metode *jogging* (pengoperasian bergantian) dan kendali berbasis *Pressure Switch* untuk mengatur kondisi ON/OFF pompa sesuai kebutuhan tekanan instalasi. Optimasi histeresis berperan krusial dalam menentukan *set point* pompa, yang selanjutnya memengaruhi frekuensi *cycling* dan efisiensi energi. Perbandingan konsumsi energi listrik menunjukkan efektivitas metode *panel jogging*. Selama periode pengukuran kerja pompa, yaitu dari pukul 09.00 hingga 18.00, diperoleh penghematan energi listrik sebesar 16,09 kWh ketika sistem *jogging* dioperasikan. Pengukuran ini membandingkan kinerja antara panel yang menggunakan metode *jogging* dan panel yang beroperasi dengan metode ON/OFF secara serentak. Hasilnya menunjukkan persentase penghematan energi yang signifikan, mencapai 32,9%.

Simpulan

Penerapan logika histeresis sebesar 1 bar terbukti efektif mereduksi frekuensi *start-stop (cycling)* pompa yang berlebihan. Hal ini berdampak langsung pada penurunan lonjakan arus (*inrush current*) motor dan menciptakan stabilitas tekanan distribusi air yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional. Optimasi sistem ini menghasilkan peningkatan efisiensi energi yang signifikan, dengan total penghematan daya mencapai **32,86%** pada kondisi pembebanan dinamis dibandingkan dengan skema kendali tanpa manajemen histeresis. *Smart Relay* Zelio layak diimplementasikan sebagai solusi kontrol otomatis yang ekonomis dan handal untuk menggantikan fungsi PLC pada aplikasi pompa *booster* skala menengah, terutama dalam mengatasi masalah *chattering* pada sensor tekanan mekanis.

Sebagai pengembangan penelitian di masa depan, disarankan untuk mengintegrasikan sistem ini dengan platform *monitoring* berbasis *Internet of Things (IoT)* atau SCADA. Hal ini diperlukan agar parameter tekanan air dan profil konsumsi energi dapat dipantau dan dianalisis secara *real-time* dari jarak jauh.

Daftar Pustaka

- [1] P. Saksono, "Analisa Efisiensi Pompa Centrifugal Pada Instalasi Pengolahan Air Kampung Damai Balikpapan," *Jurnal Teknik Mesin Universitas Balikpapan*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2010.
- [2] S. Sarjito and W. A. Siswanto, *Mekanika dan Dinamika Fluida*. Surakarta: Muhammadiyah University Press, 2018.
- [3] M. S. Martins, "Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings," *Energy Build*, vol. 250, p. 111285, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111285.
- [4] D. Kaya, F. Çanka, K. Hasan, and H. Öztürk, *Energy Management and Energy Efficiency in Industry: Practical Examples*. Cham: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-74556-9.
- [5] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Reduction of current harmonics in BLDC motors using the proposed sigmoid trapezoidal current hysteresis control," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 355, 2023, doi: 10.3390/en16070355.

- [6] C. Maier and G. Schlager, "Advanced hysteresis control of brushless DC motors for pumping applications," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 45–52, 2022, doi: 10.2478/jee-2022-0006.
- [7] T. O. Andersen and M. Hansen, "Hysteresis control in pump-controlled systems—A way to reduce mode-switch oscillations in closed and open circuits," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 424, 2022, doi: 10.3390/en15020424.
- [8] Z. Gao, "Adaptive sliding-mode with hysteresis control strategy for simple multi-mode hybrid energy storage system," *J Power Sources*, vol. 343, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.076.
- [9] Mastur and Warso, "Pengaruh Putaran Terhadap Pompa Sentrifugal Pada Rangkaian Seri Dan Paralel," in *Prosiding Senatek Fakultas Teknik*, Universitas Muhammadiyah Purwokerto, 2015, pp. 55–60.
- [10] I. Febrianto, M. Khabib, and B. S. Nugraha, "Perancangan Sistem Pompa Paralel Dengan Daya Bervariasi Untuk Meningkatkan Kapasitas Air," *Jurnal Crankshaft*, vol. 3, no. 1, pp. 19–28, 2020, doi: 10.24176/crankshaft.v3i1.4688.
- [11] Supardi and M. M. Renwarin, "Pengaruh Variasi Debit Aliran Dan Pipa Isap (Section) Terhadap Karakteristik Pompa Sentrifugal Yang Dioperasikan Secara Paralel," *Mekanika Jurnal Teknik Mesin*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2015.
- [12] A. T. B. Pratomo, H. Ghazidin, and F. M. Kuswa, "Rancangan sistem kontrol pompa menggunakan smart relay pada peralatan uji umur filter," in *TECHNOPEX-2018 Institut Teknologi Indonesia*, 2018, pp. 236–241.
- [13] H. Luthfiyah and T. Soehartanto, "Perancangan Switching Control Pada Paralel Pump Submersible Di Sumur Intake Instalasi Pengolahan Air (IPA) PDAM Gresik," *Jurnal Teknik ITS*, 2010.
- [14] I. Setiadi and I. Kustianto, "Otomatisasi Kontrol Pompa Ultrafiltrasi dan Pompa Tekanan Tinggi Reverse Osmosis pada Unit Air Siap Minum menggunakan Schneider Zelio Smart Relay," *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, vol. 14, no. 1, pp. 49–59, 2021, doi: 10.29122/jrl.v14i1.4447.
- [15] H. I. L. Hasanah, "Automatisasi Pompa Irigasi pada Sistem Irigasi Tetes Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," *ARZUSIN*, vol. 2, no. 6, pp. 520–531, 2022.
- [16] A. A. Rafiq, "Optimalisasi Smart Relay Zelio sebagai Kontroler Lampu Penerangan Jalan Umum," *J Teknol*, vol. 12, no. 2, pp. 91–98, 2020, doi: 10.24853/jurtek.12.2.91-98.
- [17] I. Setiadi and J. Prayitno, "Smart relay-based control system for reverse osmosis drinking water treatment," *Indonesian Journal of Health Science Management*, vol. 12, no. 2, pp. 175–184, 2023.
- [18] C. Dinis and G. Popa, "Automation heating and pumping for water using Zelio PLC," in *Proc. 10th Int. Symp. Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2018, pp. 345–348. doi: 10.1109/ATEE.2017.7905132.
- [19] M. Suhendar and M. Hariansyah, "Rancangan Smart Relay Zelio pada Pengoperasian Pompa Air Bersih Gedung Bertingkat," *Jurnal Elektro Universitas Pakuan*, vol. 5, no. 2, 2020.
- [20] T. A. T. Olabisi, N. B. Yahya, and R. T. A. Adewale, "Development of an Energy Efficient Automated Water Pumping System Using Programmable Logic Controller (PLC)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, p. 012022. doi: 10.1088/1755-1315/1135/1/012022.
- [21] A. S. Putra and H. Wibowo, "Simulation of water supply pump system with PLC based control for high-rise buildings," in *Proc. SCITEPRESS*, 2022, pp. 91–98. doi: 10.5220/0010945200003260.
- [22] C. P. Sanyoto, J. A. F. A. W. Pratama, and R. Z. Ramadhan, "Analisis Unjuk Kerja Pompa Sentrifugal dengan Variasi Diameter Pipa Hisap," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 29–38, 2020.
- [23] W. B. Jauhari, M. B. R. S. Siregar, and M. I. H. S. Nasution, "Analisis Kinerja Pompa Sentrifugal Yang Dirangkai Secara Paralel," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 7–12, 2023.
- [24] J. Wang, X. Luo, and H. Liu, "Hysteresis characteristic in the hump region of a pump-turbine model," *Renew Energy*, vol. 183, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.10.088.
- [25] X. Zhang, G. Zhang, and Z. Wu, "Energy-efficient scheduling of multiple pumps in water distribution systems via a modified particle swarm optimization," *Water (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 488, 2023, doi: 10.3390/w15030488.
- [26] S. Yuan and X. Gong, "Optimization of centrifugal pump diffuser for energy saving using modified particle swarm algorithm," *Renew Energy*, vol. 185, pp. 120–131, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.030.
- [27] W. Wang, Z. Han, and J. Pei, "Energy efficiency optimization of water pump based on heuristic algorithm and computational fluid dynamics," *J Comput Des Eng*, vol. 10, no. 1, pp. 382–397, 2023, doi: 10.1093/jcde/qwac136.
- [28] J. Deuerlein and A. R. Simpson, "The energy-efficiency benefits of pump-scheduling optimization for potable water supplies," *J Water Resour Plan Manag*, vol. 148, no. 4, p. 04022005, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001538.