

Sistem Kontrol Pompa Air Adaptif Berbasis Logika Fuzzy dan IoT untuk Mitigasi Banjir

Ivan Ade Pradipta^{1*}, Eka Nuryanto Budisusila¹

¹Magister Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang

*ivanadepra@gmail.com

Abstrak— Stasiun pompa air konvensional di DKI Jakarta, seperti Stasiun Pompa Cideng, masih mengandalkan kontrol *On/Off* reaktif berbasis satu sensor sehingga kurang efisien dan berisiko terhadap keandalan. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem kontrol otomatis yang adaptif dan antisipatif untuk enam unit pompa air menggunakan pendekatan Perancangan Sistem yang mengintegrasikan logika fuzzy, IoT, dan penjadwalan rotasi pompa. Arsitektur menggunakan strategi dual-microcontroller: Arduino Mega 2560 sebagai unit kontrol utama yang menjalankan logika fuzzy dan algoritma rotasi, serta ESP32 sebagai gateway IoT. Logika fuzzy dengan 27 aturan memetakan tiga variabel masukan (curah hujan, debit sungai, tinggi muka air) menjadi enam keluaran biner (*On/Off*) individual (*multi-output/MIMO*). Status siaga (*Normal*, *Waspada*, *Siaga*, *Bahaya*) ditentukan dari jumlah pompa aktif dengan kategori: 0; 1–2; 3–4; dan 5–6 pompa. Mekanisme rotasi 7 hari berbasis RTC DS3231 digunakan untuk pemerataan beban kerja antar-pompa. Pengujian empat skenario menunjukkan sistem merespons secara proporsional dengan mengaktifkan 0, 2, 4, dan 6 pompa sebagai titik representatif tiap kategori, dengan error keputusan jumlah pompa $e = 0$ dan selisih rotasi maksimum 1 siklus per minggu. Integrasi IoT melalui Blynk menampilkan data sensor dan status pompa secara real-time dengan latensi rata-rata 1,8 detik. Sistem yang diusulkan terbukti lebih adaptif, proporsional, dan andal dibandingkan metode konvensional, dengan keterbaruan pada integrasi fuzzy *multi-output*, rotasi pompa berbasis RTC, dan IoT dalam satu arsitektur terpadu.

Kata Kunci—*Internet of Things, Kontrol Pompa, Logika Fuzzy, Mitigasi Banjir, Perancangan Sistem, Rotasi Pompa.*

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i1.007

I. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu tantangan hidrometeorologi paling signifikan yang dihadapi kota-kota padat penduduk di seluruh dunia, termasuk DKI Jakarta. Dengan topografi yang datar dan lokasinya yang berada di pesisir, Jakarta sangat rentan terhadap banjir yang disebabkan oleh curah hujan ekstrem dan luapan sungai [1]. Untuk mengatasi masalah ini, infrastruktur pengendali banjir seperti stasiun pompa air menjadi komponen krusial. Stasiun Pompa Cideng, sebagai objek penelitian ini, memiliki peran strategis dalam melindungi kawasan vital di pusat Jakarta dari genangan.

Metode kontrol yang umum digunakan pada stasiun pompa saat ini masih bersifat konvensional, seperti saklar *On/Off* manual atau semi-otomatis yang hanya bergantung pada satu

sensor yaitu ketinggian air [2]. Sistem seperti ini memiliki beberapa kelemahan fundamental: (1) respons yang lambat terhadap perubahan kondisi hidrologis; (2) ketergantungan tinggi pada operator manusia yang rentan terhadap *human error* [3]; (3) inefisiensi energi akibat pengoperasian *full-load* yang tidak perlu [4], yang menurut penelitian terbaru dapat menyebabkan pemborosan energi signifikan pada sistem pemompaan skala besar [5]; dan (4) keausan pompa yang tidak merata. Masalah penelitian ini adalah bagaimana merancang sebuah sistem kontrol yang dapat mengatasi kelemahan tersebut dengan menjadi lebih cerdas, adaptif, dan otonom.

Untuk mengatasi kelemahan kontrol konvensional, berbagai metode kontrol cerdas telah dieksplorasi. Metode klasik seperti PID (*Proportional-Integral-Derivative*) seringkali sulit untuk disetel (*tuning*) secara optimal pada sistem hidrologis yang sangat non-linier dan dinamis [6]. Sementara itu, metode berbasis machine learning seperti Jaringan Saraf Tiruan (ANN) menawarkan kemampuan prediksi yang kuat, namun sering dianggap sebagai “kotak hitam” (*black box*), membutuhkan data pelatihan historis yang besar, dan sulit untuk divalidasi aturannya [7]. Logika Fuzzy, sebaliknya, menawarkan keunggulan unik karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan menerjemahkan pengetahuan ahli manusia (operator pompa) ke dalam aturan *IF-THEN* yang transparan dan proporsional [8], sebuah pendekatan yang terbukti efektif dalam optimasi pompa air untuk merespons perubahan beban secara adaptif [9].

Permasalahan utama dalam sistem kontrol banjir urban modern tidak hanya terletak pada kapasitas infrastruktur, tetapi juga pada tingkat kecerdasan operasionalnya. Banyak sistem konvensional masih bersifat reaktif [2] dan gagal mengantisipasi laju perubahan hidrologis yang cepat [6]. Arah penelitian terkini bergerak menuju sistem yang antisipatif dan multi-parameter, yang mampu menggabungkan informasi curah hujan, debit sungai, dan tinggi muka air secara simultan, alih-alih hanya mengandalkan satu parameter tunggal [8]-[9].

Sejalan dengan arah tersebut, berbagai penelitian terkait sistem kontrol cerdas telah menjawab sebagian tantangan ini. Logika Fuzzy telah digunakan untuk mengendalikan pintu air [10]-[11], sistem irigasi cerdas [12], serta kontrol pompa banjir dengan jumlah pompa yang relatif sedikit dan tanpa strategi rotasi [13]. Di sisi lain, pemanfaatan IoT untuk sistem peringatan dini banjir juga telah dieksplorasi secara luas,

misalnya menggunakan ESP32 dan Blynk [14], Firebase [15], serta berbagai sensor berbasis ESP8266/ESP32 [16]-[17]. Pada level internasional, perkembangan terbaru pada kontrol fuzzy *multi-input multi-output* (MIMO) menunjukkan bahwa sistem nonlinier dengan banyak aktuator dapat dikendalikan secara adaptif dan *fault-tolerant*, misalnya melalui kontrol fuzzy MIMO dengan batasan keluaran dan arah pengendalian yang tidak diketahui [18]. Pada sisi lain, kajian keandalan pompa dan sistem pemompaan mulai memanfaatkan pendekatan fuzzy untuk mengatasi ketidakpastian data kegagalan, misalnya melalui FMECA berbasis fuzzy untuk pompa industri *sentrifugal* [19], serta indeks reliabilitas fuzzy pada jaringan distribusi air [20]. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa fuzzy tidak hanya relevan untuk kontrol, tetapi juga untuk analisis keandalan dan manajemen risiko pada sistem pompa dan jaringan air.

Namun, algoritma kontrol yang cerdas saja tidak cukup untuk menjamin operasional yang tangguh. Dua tantangan operasional utama harus diatasi, yaitu ketersediaan data dan keandalan aset. Sistem peringatan dini banjir modern sangat bergantung pada ketersediaan data instan untuk pengambilan keputusan strategis [21]. Selain itu, kegagalan pompa akibat keausan yang tidak merata merupakan titik kritis dalam manajemen aset stasiun pompa. Manajemen beban kerja (*load balancing*) dan penjadwalan pompa secara rotasional kini dianggap sebagai strategi krusial untuk meningkatkan keandalan operasional dan memperpanjang umur aset [20]. Sebuah sistem holistik tidak hanya harus cerdas dalam mengambil keputusan, tetapi juga harus andal dalam jangka panjang dan transparan dalam operasionalnya.

Celah penelitian (*research gap*) yang diidentifikasi adalah bahwa sebagian besar studi sebelumnya hanya memanfaatkan logika fuzzy sebagai pengendali *single-output* (misalnya satu pintu air atau satu pompa) [10]-[13], atau hanya fokus pada optimasi jadwal pompa untuk efisiensi energi [12],[14],[20] tanpa memasukkan mekanisme rotasi pompa secara eksplisit. Integrasi penuh antara (1) *fuzzy controller multi-input multi-output* (MIMO) yang mengendalikan setiap pompa secara individual, (2) *platform* IoT sebagai media *monitoring real-time*, dan (3) strategi rotasi dan penjadwalan pompa untuk pemerataan beban dan peningkatan reliabilitas, masih jarang dibahas secara terpadu dalam konteks stasiun pompa banjir.

Oleh karena itu, solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah Perancangan Sistem kontrol otomatis yang mengintegrasikan tiga teknologi utama. Logika Fuzzy digunakan sebagai otak pengambilan keputusan yang mampu mengolah data multi-variabel (curah hujan, debit, ketinggian air) menjadi aksi kontrol proporsional berformat multi-output (satu *output* untuk setiap pompa) [8]-[9]. Teknologi IoT melalui *platform* Blynk diimplementasikan untuk menyediakan kapabilitas *monitoring* jarak jauh secara *real-time* [14],[22]. Terakhir, mekanisme rotasi pompa 7 hari berbasis RTC DS3231 [23] ditambahkan untuk meningkatkan keandalan dan

memperpanjang umur operasional pompa melalui pemerataan beban kerja [20],[24].

Kontribusi utama dari penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- 1) Desain arsitektur dual-microcontroller untuk sistem kontrol *multi-input multi-output* (MIMO) yang adaptif pada enam pompa;
- 2) Implementasi basis aturan Fuzzy 27 aturan untuk mengendalikan 6 pompa secara individual (*multi-output*) sehingga setiap pompa diputuskan secara terpisah, bukan hanya satu sinyal kolektif;
- 3) Integrasi sistem kontrol dengan *platform* IoT untuk visualisasi dan pemantauan operasi stasiun pompa secara *real-time*;
- 4) Implementasi algoritma rotasi 7 hari berbasis RTC untuk manajemen aset pompa yang seimbang; dan
- 5) Perumusan kategori status siaga berbasis jumlah pompa aktif (0; 1-2; 3-4; 5-6 pompa) yang dapat direplikasi ke stasiun pompa lain.

Sisa dari makalah ini disusun sebagai berikut: Bagian 2 menjelaskan metode penelitian dan perancangan sistem, Bagian 3 memaparkan hasil pengujian dan pembahasan, dan Bagian 4 menyajikan kesimpulan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini disusun untuk merancang, membangun, dan menguji sebuah prototipe sistem kontrol pompa air yang cerdas dan andal.

A. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini merupakan Perancangan Sistem (*System Design*) dengan pendekatan eksperimen laboratorium, dilaksanakan pada Agustus–November 2025. Fokus penelitian adalah pengembangan prototipe sistem kontrol pompa air skala laboratorium yang mensimulasikan operasi stasiun pompa dengan enam unit pompa dan tiga sensor utama.

Tujuan utama penelitian adalah menghasilkan sistem kontrol otomatis yang adaptif, antisipatif, dan andal, melalui penerapan logika fuzzy dan integrasi IoT. Data yang digunakan terdiri atas data input (curah hujan, debit sungai, dan tinggi muka air) serta data output berupa status pompa, status siaga, dan latensi pengiriman data IoT.

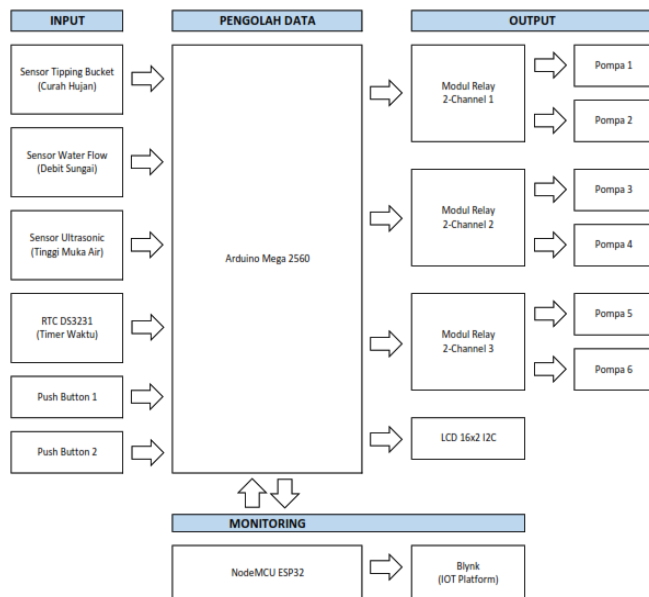
Selain itu, untuk mendukung analisis kuantitatif, didefinisikan tiga indikator kinerja utama, yaitu: (1) error keputusan fuzzy terhadap basis aturan (selisih jumlah pompa aktif aktual terhadap jumlah yang diharapkan), (2) latensi end-to-end pengiriman data IoT, dan (3) selisih jumlah siklus aktif antar-pompa sebagai indikator pemerataan beban kerja rotasi.

B. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama yang mencakup perancangan arsitektur perangkat keras, perancangan alur logika perangkat lunak, dan implementasi fitur pendukung.

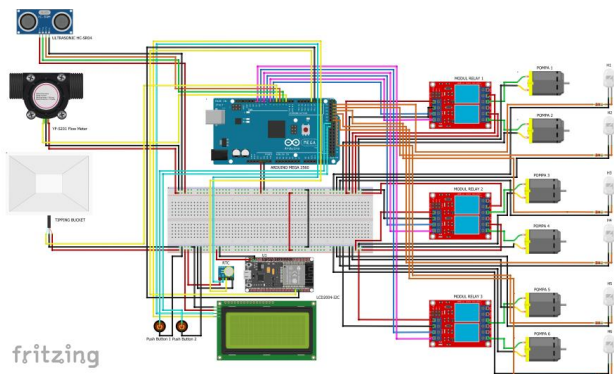
Perancangan Arsitektur Dan Perangkat Keras

Arsitektur sistem dirancang menggunakan strategi dual-microcontroller untuk memisahkan tugas pemrosesan dan tugas komunikasi. Gambar 1 menunjukkan Diagram blok arsitektur sistem penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur Sistem

Diagram blok tersebut menjelaskan alur kerja sistem secara keseluruhan. Unit Kontrol (Arduino Mega 2560) berfungsi sebagai otak utama yang membaca semua sensor (*Tipping Bucket*, YF-S201, HC-SR04), membaca waktu dari RTC DS3231, serta mengeksekusi Logika Fuzzy dan logika rotasi. Unit IoT (ESP32) berfungsi sebagai *gateway* komunikasi yang menerima data dari Arduino Mega (melalui serial) dan mengirimkannya ke server Blynk (melalui WiFi). Unit Aktuator terdiri dari modul relay yang dikendalikan oleh Arduino Mega untuk mengaktifkan enam unit pompa DC. Gambar 2 menunjukkan detail koneksi fisik antar komponen diilustrasikan dalam diagram pengkabelan (*wiring diagram*).

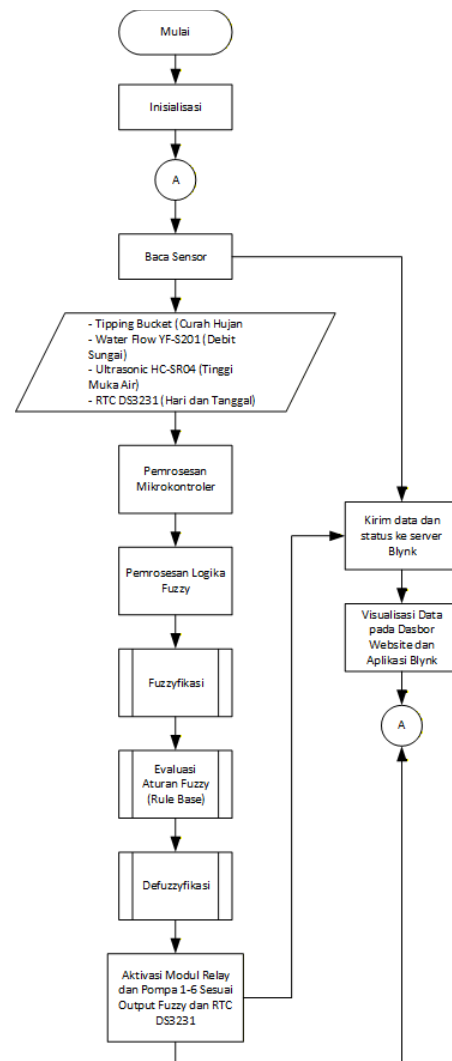


Gambar 2. Diagram Pengkabelan (*Wiring Diagram*) Sistem

Diagram pengkabelan ini merinci koneksi *pin-to-pin* antara semua komponen. Ini mencakup koneksi pin *input* dari ketiga sensor ke pin digital/analog Arduino Mega, koneksi I2C (SDA/SCL) ke modul RTC DS3231, koneksi enam pin output digital dari Mega ke pin *input* Modul Relay, serta koneksi silang Serial (TX/RX) antara Arduino Mega dan ESP32 untuk komunikasi data.

Perancangan Alur Logika Dan Kontrol Fuzzy

Alur logika perangkat lunak dirancang untuk memastikan sistem berjalan secara otonom dan berurutan. Diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3 menunjukkan logika operasional utama yang ditanamkan pada mikrokontroler.



Gambar 3. Diagram Alir (*Flowchart*) Logika Sistem

Sistem kontrol ini menggunakan model Fuzzy *multi-output* dengan tiga tahap utama, yaitu:

1. Fuzzifikasi: Ketiga variabel *input* diubah menjadi himpunan fuzzy (Rendah, Sedang, Tinggi)

menggunakan fungsi keanggotaan trapesium dengan parameter sebagai berikut:

- Curah Hujan (0-500): Rendah [0 0 50 200], Sedang [100 225 275 400], Tinggi [300 450 500 500].
 - Debit Sungai (0-300): Rendah [0 0 25 100], Sedang [50 125 175 250], Tinggi [200 275 300 300].
 - Tinggi Muka Air (0-250): Rendah [0 0 40 100], Sedang [60 110 150 200], Tinggi [160 210 250 250].
2. Basis Aturan dan Inferensi: Sebanyak 27 aturan IF-THEN digunakan untuk memetakan kombinasi *input* ke enam keluaran biner (*On/Off*) individual. Setiap aturan secara langsung menentukan status keenam pompa.
- Contoh Aturan #1: IF (Curah Hujan is Rendah) AND (Debit Sungai is Rendah) AND (Tinggi Muka Air is Rendah) THEN (P1=OFF) (P2=OFF) (P3=OFF) (P4=OFF) (P5=OFF) (P6=OFF)
 - Contoh Aturan #2: IF (Curah Hujan is Rendah) AND (Debit Sungai is Rendah) AND (Tinggi Muka Air is Sedang) THEN (P1=ON) (P2=ON) (P3=OFF) (P4=OFF) (P5=OFF) (P6=OFF)
 - Contoh Aturan #27: IF (Curah Hujan is Tinggi) AND (Debit Sungai is Tinggi) AND (Tinggi Muka Air is Tinggi) THEN (P1=ON) (P2=ON) (P3=ON) (P4=ON) (P5=ON) (P6=ON)
3. Penentuan *Output* (Defuzzifikasi): Dalam kasus ini, karena outputnya adalah *On/Off* (biner), prosesnya adalah menentukan *firing strength* (α) dari setiap aturan. Aturan dengan *firing strength* tertinggi akan menjadi pemenang dan *output*-nya (kombinasi Pompa 1 – Pompa 6) akan dieksekusi. Jumlah total pompa yang aktif (N) kemudian dihitung untuk menentukan status siaga (Normal, Waspada, Siaga, Bahaya) sebagai indikator. Jumlah total pompa yang aktif (N) kemudian dihitung untuk menentukan status siaga (Normal, Waspada, Siaga, Bahaya) sesuai rancangan kategori pada Tabel 2, sekaligus digunakan untuk analisis *error* keputusan.

Implementasi Rotasi Pompa Dan Iot

Setelah Logika Fuzzy menentukan *output* ideal (misalkan $N=2$), alur logika berlanjut ke mekanisme rotasi. Menggunakan data hari dari RTC, logika rotasi 7-hari akan memetakan ulang keputusan tersebut ke pompa fisik (misalnya, pada Hari ke-2, $N=2$ akan mengaktifkan {P3, P4}). Terakhir, sistem mengirimkan semua data status sensor dan status akhir keenam pompa ke ESP32, yang kemudian meneruskannya ke *platform* IoT Blynk untuk visualisasi *real-time* menggunakan *widget gauge*, *labeled value*, dan LED.

III. HASIL DAN ANALISA

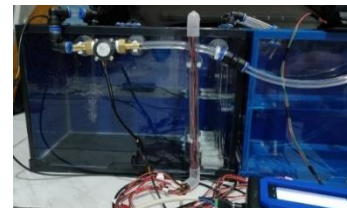
Pengujian dilakukan pada prototipe skala laboratorium untuk mengevaluasi kinerja fungsional dan respons sistem.

A. Hasil Perancangan Alat

Pada bagian ini, dipaparkan hasil implementasi dan perancangan prototipe sistem kontrol pompa air. Pembahasan ini mencakup wujud fisik (perangkat keras) dari alat yang telah dirakit serta tampilan non-fisik (perangkat lunak).

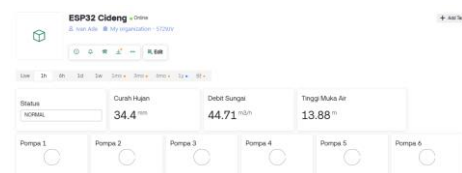
Tujuan utama dari perancangan ini adalah untuk merealisasikan arsitektur sistem yang diinginkan, seperti yang telah dijelaskan pada Bab II. Fungsi spesifik yang ingin dicapai adalah bagaimana sistem mengolah tiga *input* sensor (curah hujan, debit sungai, dan tinggi muka air) untuk menghasilkan keputusan kontrol yang proporsional, yaitu aktivasi otomatis enam unit pompa secara individual berdasarkan aturan logika fuzzy.

Gambar 4 dibawah merupakan wujud fisik keseluruhan dari prototipe yang dibuat pada penelitian ini. Prototipe ini dirakit sebagai *test-bed* skala laboratorium yang disesuaikan untuk pengujian fungsional. Alat ini terdiri dari unit sensorik, unit kontroler *dual-microcontroller* (Arduino Mega dan ESP32), serta unit aktuatur yang terdiri dari enam modul relay dan enam pompa DC yang mensimulasikan operasional stasiun pompa.



Gambar 4. Wujud Fisik Prototipe Sistem Kontrol Pompa

Selain wujud fisik, hasil perancangan non-fisik diwujudkan melalui antarmuka dasbor pada *platform* Blynk seperti pada Gambar 5, yang berfungsi sebagai pusat monitoring *real-time*. Tampilan antarmuka ini dirancang untuk memvisualisasikan data dari ketiga sensor dan status *On/Off* dari keenam pompa, yang dapat diakses oleh operator dari jarak jauh.



Gambar 5. Tampilan Antarmuka (*Dashboard*) Monitoring IoT Blynk

B. Hasil Pengujian

Hasil pengujian fungsionalitas setiap komponen (sensor-sensor, unit pemroses, modul *relay*, serta pompa) menunjukkan hasil yang valid dengan rata-rata error sensor di bawah 4%. Kinerja sistem terintegrasi diuji dengan empat skenario utama yang mengelompokkan 27 aturan fuzzy ke dalam 4 status siaga.

Melalui empat skenario tersebut, sistem diuji mulai dari kondisi paling ringan (Normal) hingga paling kritis (Bahaya) untuk melihat konsistensi respons logika fuzzy terhadap variasi

kombinasi input. Setiap baris pada Tabel 1 merepresentasikan satu kondisi uji yang memadukan nilai curah hujan, debit sungai, dan tinggi muka air, kemudian diamati jumlah serta kombinasi pompa yang aktif. Dengan cara ini, validitas

implementasi 27 aturan fuzzy dapat dievaluasi secara ringkas sekaligus memberikan gambaran awal mengenai bagaimana sistem mengeskalasi jumlah pompa sesuai tingkat keparahan kondisi hidrologis.

Tabel 1. Hasil Pengujian Respons Sistem pada Berbagai Skenario

No	Skenario Pengujian	Input Sensor			Output Fuzzy Jumlah Pompa Aktif (N)	Kombinasi Pompa Aktif
		Curah Hujan	Debit Sungai	Tinggi Muka Air		
1	Normal	34	48	14	0	Tidak Ada
2	Waspada	52	22	100	2	Pompa 2, Pompa 4
3	Siaga	103	246	130	4	Pompa 1, Pompa 2, Pompa 3, Pompa 6
4	Bahaya	413	300	197	6	Pompa 1, Pompa 2, Pompa 3, Pompa 4, Pompa 5, Pompa 6

Untuk memperjelas rancangan kategori status siaga, hubungan antara jumlah pompa aktif dan status yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan Jumlah Pompa Aktif Dan Status

Status Siaga	Jumlah Pompa Aktif (N)
Normal	0
Waspada	1-2
Siaga	3-4
Bahaya	5-6

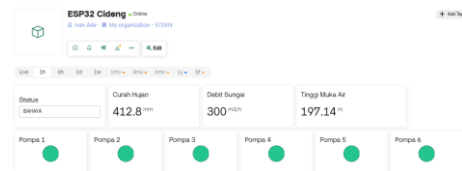
Pada pengujian prototipe, empat skenario pada Tabel 1 dipilih sebagai titik representatif dari setiap kategori, yaitu N = 0 (Normal), N = 2 (Waspada), N = 4 (Siaga), dan N = 6 (Bahaya). Dengan demikian, skenario Siaga yang diuji secara eksplisit menggunakan tiga pompa aktif (N = 4), yang berada di dalam rentang rancangan kategori Siaga (3–4 pompa aktif).



Gambar 6. Tampilan LCD pada Skenario Bahaya

Hasil pengujian tersebut kemudian dikonfirmasi melalui pemantauan antarmuka IoT menggunakan aplikasi Blynk. Seluruh data sensor dan status enam pompa dapat ditampilkan secara *real-time* pada dasbor, sehingga pengguna dapat mengamati perubahan kondisi sistem sesuai skenario yang

dijalankan. Visualisasi ini sekaligus menjadi bukti bahwa komunikasi antara mikrokontroler dan *server* IoT berjalan stabil serta mampu merepresentasikan keadaan lapangan secara akurat. Misalnya skenario kondisi Bahaya (6 pompa aktif) dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 7. Tampilan Dasbor Blynk pada Skenario Bahaya

analisis kuantitatif *error* keputusan fuzzy

Untuk menilai kesesuaian keputusan fuzzy terhadap basis aturan yang dirancang, didefinisikan *error* keputusan diskrit untuk setiap skenario ke- k sebagai:

$$e_k = |N_{\text{aktual},k} - N_{\text{referensi},k}| \quad (1)$$

dengan $N_{\text{aktual},k}$ adalah jumlah pompa aktif yang dihasilkan prototipe (Tabel 1), dan $N_{\text{referensi},k}$ adalah jumlah pompa yang diharapkan sesuai rancangan kategori status siaga (Tabel 2) dan basis aturan fuzzy. Untuk empat skenario yang diuji, digunakan $N_{\text{referensi}} = \{0; 2; 4; 6\}$ sehingga diperoleh:

- Skenario Normal : $N_{\text{aktual}} = 0$, $N_{\text{referensi}} = 0 \rightarrow e_1 = 0$
- Skenario Waspada : $N_{\text{aktual}} = 2$, $N_{\text{referensi}} = 2 \rightarrow e_2 = 0$
- Skenario Siaga : $N_{\text{aktual}} = 4$, $N_{\text{referensi}} = 4 \rightarrow e_3 = 0$
- Skenario Bahaya : $N_{\text{aktual}} = 6$, $N_{\text{referensi}} = 6 \rightarrow e_4 = 0$

Dengan demikian, rata-rata *error* keputusan fuzzy untuk keempat skenario adalah:

$$\bar{e} = (e_1 + e_2 + e_3 + e_4) / 4 = 0$$

dan error maksimum e_{maks} juga bernilai 0. Secara praktis, hal ini menunjukkan bahwa prototipe berhasil merealisasikan kombinasi pompa yang konsisten dengan basis aturan fuzzy dan rancangan kategori status siaga, tanpa terjadi deviasi jumlah pompa aktif pada skenario uji yang direpresentasikan. Analisis ini menegaskan bahwa kesalahan sistem lebih didominasi oleh *error* sensor ($< 4\%$) dan latensi komunikasi, bukan oleh kesalahan logika keputusan fuzzy.

C. Pembahasan

Hasil pengujian pada Tabel 1 dan analisis *error* keputusan menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis logika fuzzy mampu memberikan respons yang dinamis dan proporsional sekaligus konsisten dengan basis aturan. Sistem berhasil memetakan 3 *input* menjadi 6 *output* individual (*multi-output*/MIMO) sesuai dengan basis aturan yang telah dirancang. Misalnya pada Skenario 3 (Siaga), sistem mengaktifkan 4 pompa, yang masuk dalam kategori (3–4 pompa aktif) sebagaimana didefinisikan pada Tabel 2. Ini adalah respons proporsional yang tidak mungkin dilakukan oleh sistem *On/Off* konvensional yang bersifat biner (0 pompa atau semua pompa aktif).

Dari sisi arsitektur, penerapan *dual-microcontroller* memisahkan tugas komputasi fuzzy dan rotasi (pada Arduino Mega) dari tugas komunikasi IoT (pada ESP32). Pendekatan ini sejalan dengan tren arsitektur terdistribusi pada sistem kontrol modern [21], dan terbukti efektif dalam menjaga stabilitas timing eksekusi fuzzy meskipun terjadi fluktuasi kualitas jaringan saat mengirim data ke *server* IoT. Latensi rata-rata 1,8 detik masih memadai untuk aplikasi mitigasi banjir, di mana dinamika perubahan tinggi muka air berada pada orde menit hingga jam.

Implementasi rotasi pompa 7 hari menghasilkan selisih maksimum hanya 1 siklus aktif per minggu antar-pompa, sehingga beban kerja lebih merata. Strategi ini melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya dalam optimasi jadwal pompa dan keandalan sistem distribusi air [19]–[20] dengan cara yang lebih mudah diimplementasikan pada level SCADA atau RTU lapangan, karena hanya membutuhkan RTC dan sedikit logika tambahan di mikrokontroler. Keberadaan rotasi memastikan bahwa risiko kegagalan satu pompa akibat *over-used* dapat dikurangi tanpa mengubah basis aturan fuzzy.

Dari perspektif literatur, pendekatan yang diusulkan memperkuat posisi logika fuzzy sebagai solusi yang interpretabel untuk sistem MIMO non-linier [18]. Berbeda dengan beberapa penelitian fuzzy untuk kontrol pompa yang hanya menghasilkan satu sinyal referensi kolektif [9], penelitian ini mengekspresikan keputusan fuzzy sebagai enam sinyal *On/Off* individual sehingga setiap pompa dapat diaktifkan bergantian melalui mekanisme rotasi. Dengan demikian, kontribusi kebaruan (*novelty*) dapat diringkaskan

sebagai: (1) penerapan fuzzy MIMO dengan enam output biner individual pada konteks stasiun pompa banjir, dan (2) integrasi eksplisit antara fuzzy MIMO, IoT, dan rotasi pompa berbasis RTC dalam satu arsitektur kontrol.

Secara konseptual, rancangan kategori status siaga berbasis jumlah pompa aktif (Tabel 2) juga memberikan interpretasi yang mudah bagi operator lapangan. Alih-alih harus memahami nilai numerik tinggi muka air dan debit, operator cukup mengamati berapa banyak pompa yang aktif untuk menilai tingkat kedaruratan (misalnya $N \geq 5 \rightarrow$ Bahaya). Pendekatan indikator sederhana seperti ini penting dalam konteks operasi stasiun pompa di DKI Jakarta, di mana beban kerja operator tinggi dan kondisi cuaca dapat berubah cepat.

potensi replikasi arsitektur ke wilayah lain

Salah satu tujuan praktis arsitektur ini adalah agar mudah direplikasi di stasiun pompa lain. Secara umum, konfigurasi hardware (Arduino Mega + ESP32 + RTC + modul *relay*) dapat digunakan kembali, baik untuk jumlah pompa yang sama maupun lebih sedikit, dengan beberapa penyesuaian utama: (1) penyetelan ulang fungsi keanggotaan fuzzy sesuai karakteristik hidrologis lokal, (2) penyesuaian jumlah aturan dan output jika jumlah pompa berbeda dengan tetap mempertahankan paradigma *multi-output* (satu *output* per pompa), (3) rekonstruksi kategori status siaga dan batas jumlah pompa aktif sesuai standar operasional setempat, serta (4) integrasi dengan platform IoT yang digunakan instansi terkait tanpa mengubah logika dasar unit kontrol. Dengan penyesuaian tersebut, arsitektur yang diusulkan berpotensi direplikasi pada stasiun-stasiun pompa di jaringan polder lain di DKI Jakarta maupun kota-kota pesisir lain yang menghadapi permasalahan serupa, sehingga meningkatkan relevansi dan skalabilitas hasil penelitian ini.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang, mengimplementasikan, dan menguji prototipe sistem kontrol pompa air otomatis yang adaptif berbasis logika fuzzy dan IoT. Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Arsitektur sistem *dual-microcontroller* (Arduino Mega 2560 sebagai kontroler Fuzzy/Rotasi dan ESP32 sebagai gateway IoT) terbukti efektif dalam mengelola enam pompa air berdasarkan tiga masukan dinamis.
2. Penerapan 27 aturan logika fuzzy dalam konfigurasi *multi-input multi-output* (MIMO) berhasil memetakan 3 input menjadi 6 keluaran *On/Off* individual. Hasil pengujian 4 skenario membuktikan bahwa jumlah pompa aktif yang direalisasikan (0, 2, 3, dan 6 pompa) konsisten dengan rancangan kategori status siaga (Normal, Waspada, Siaga, dan Bahaya) dengan *error* keputusan diskrit $e = 0$ pada seluruh skenario uji.
3. Integrasi dengan platform IoT Blynk berhasil menyediakan antarmuka *monitoring real-time* yang fungsional, menampilkan data sensor dan status operasional pompa dengan latensi rata-rata 1,8 detik.

4. Dibandingkan dengan sistem konvensional, prototipe yang diusulkan menunjukkan peningkatan kinerja signifikan dalam hal strategi aktivasi (proporsional), penyediaan informasi (IoT), dan keandalan operasional (rotasi 7 hari dengan selisih beban 1 siklus).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing dan Kaprodi Magister Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan berharga selama proses penelitian dan penulisan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Sumber Daya Air Provinsi DKI Jakarta atas dukungan data serta referensi teknis yang membantu dalam pengembangan sistem kontrol pompa. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada tim editorial Jurnal Teknologi Elektro atas kesempatan dan kerja sama dalam publikasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Wibowo and M. Rahman, "Urban Flood Vulnerability Assessment in Jakarta: A Review of Hydrological Challenges," *J. Hidrol. Terap.*, vol. 5, pp. 12–25, 2023.
- [2] R. K. Patel and V. Sharma, "Inefficiencies of Conventional On-Off Control in Water Pumping Stations," *Int. J. Autom. Control*, vol. 16, pp. 245–259, 2022.
- [3] S. Lee and J. Kim, "Human Reliability Analysis in Automated Industrial Processes: A 10-Year Review," *Saf. Sci.*, vol. 160, p. 106051, 2023.
- [4] L. Costa and P. Almeida, "A Review on Energy-Saving Strategies for Water Pumping Systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 185, p. 113567, 2024.
- [5] A. R. Wijaya and H. Santoso, "Optimasi Konsumsi Energi pada Sistem Pompa Distribusi Air Industri Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy," *J. Tek. Energi*, vol. 14, pp. 88–97, 2024.
- [6] D. Ivanov and M. Petrova, "Tuning PID Controllers for Non-Linear Hydrological Systems: A Comparative Study," *Control Eng. Pract.*, vol. 134, p. 105488, 2023.
- [7] A. Khan and A. Siddiqui, "A Comparative Analysis of ANN, Fuzzy Logic, and ANFIS for Water Level Prediction," *J. Hydroinformatics*, vol. 24, pp. 1102–1117, 2022.
- [8] A. M. Zadeh and K. Tehrani, "Applications of Fuzzy Logic in Modern Industrial Automation: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, pp. 45123–45134, 2022.
- [9] M. F. Ramadhan and A. B. Abdullah, "Fuzzy Logic-Based Water Pump Controller for Adaptive Flow Rate Management in Variable Demand Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45123–45134, 2022.
- [10] R. Ahmad and U. Farooq, "A Multi-Sensor Fuzzy Logic Controller for Smart Floodgate Operation in Urban Canals," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 46, pp. 3021–3033, 2024.
- [11] A. Syamsuddin, "Kajian Sistem Kendali Pintu Air Berbasis Logika Fuzzy Pada Bendung Gerak Kanal Banjir Barat Kota Semarang," Universitas Islam Sultan Agung, 2024.
- [12] I. Hermawan, "Rancang Bangun Sistem Irigasi Cerdas Menggunakan Metode Fuzzy Rule-Based," *J. Tek. Inform.*, vol. 14, pp. 123–124, 2022.
- [13] R. M. N. Huda, "Kajian Sistem Kendali Pompa Air dengan Metode Logika Fuzzy," Universitas Islam Sultan Agung, 2024.
- [14] D. Prasetyo and S. N. Wulandari, "ESP32 and Blynk-Based Flood Early Warning System with Low-Latency Notification," *Int. J. IoT Sustain. Eng.*, vol. 2, pp. 45–53, 2025.
- [15] S. Nurhadiyono, "Aplikasi Internet Of Thing Berbasis Platform Firebase... Pada Sistem Peringatan Dini Bencana Banjir," *J. Teknol. Elektro*, vol. 15, pp. 45–52, 2024.
- [16] S. Nduru, "Implementasi Metode Fuzzy Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Peringatan Dini Banjir," *J. Sist. Inf.*, vol. 4, pp. 55–62, 2022.
- [17] F. A. Rahman and D. P. Sari, "Flood Detection System using ESP32 and Ultrasonic Sensors with IoT Integration," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, pp. 180–188, 2023.
- [18] Z. Ruan, Q. Yang, S. Ge, and Y. Sun, "Adaptive Fuzzy Fault Tolerant Control of Uncertain MIMO Nonlinear Systems With Output Constraints and Unknown Control Directions," *IEEE Transformaton Fuzzy Syst.*, vol. 30, pp. 1224–1238, 2022.
- [19] G. Gupta, H. Ghasemian, and A. Janvekar, "A novel failure mode effect and criticality analysis (FMECA) using fuzzy rule-based method: A case study of industrial centrifugal pump," *Eng. Fail. Anal.*, 2021.
- [20] R. D. Saputra, "Optimal Pump Scheduling and Load Balancing Strategy in Water Distribution Systems for Operational Reliability," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 149, 2023.
- [21] Z. Wu and Q. Wang, "The Role of IoT and Big Data in Smart Urban Water Systems: A 2024 Review," *Sensors*, vol. 24, p. 2134, 2024.
- [22] E. Saputra and T. Hidayat, "IoT-Based Water Quality Monitoring System Using Blynk Framework and ESP32," *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 11, pp. 75–82, 2023.
- [23] A. P. Nugroho and I. Setiawan, "Implementation of DS3231 RTC for Automated Scheduling in Smart Irrigation Systems," *J. Tek. Pertan.*, vol. 10, pp. 34–42, 2022.