

Sistem Kendali dan *Monitoring* Ketinggian Air Tandon Berbasis *Internet of Things* dengan Logika Fuzzy Mamdani

Fernando Juliansyah^{1*}, Desmira¹, Mohammad Fatkhurrohman¹

¹Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Kota Serang, Banten, 42117, Indonesia

Penulis Korespondensi: Fernando Juliansyah (e-mail: fernandojuliansyah222@gmail.com)

ABSTRAK

Pengendalian dan *monitoring* ketinggian air pada tandon diperlukan untuk mengetahui kondisi air serta mengatur proses pengisian sesuai kebutuhan. Kondisi tandon tidak hanya berubah akibat proses pengisian, tetapi juga akibat penggunaan air yang berlangsung selama sistem bekerja. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji *prototype* sistem kendali dan *monitoring* ketinggian air tandon berbasis *Internet of Things* menggunakan logika fuzzy Mamdani. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama dengan HC-SR04 untuk mengukur ketinggian air, DS18B20 untuk kompensasi suhu, serta dua sensor YF-S201 untuk memperoleh debit pada jalur masuk dan keluar. Logika fuzzy menggunakan ketinggian air dan aktivitas penggunaan air sebagai dua masukan untuk menentukan tingkat kendali pompa melalui PWM. Sistem juga dilengkapi proteksi *dry run* dan *overflow*, sedangkan data kondisi sistem ditampilkan melalui Blynk. Pengujian dilakukan terhadap pembacaan sensor ultrasonik, kompensasi suhu, keluaran kendali fuzzy, proteksi, dan operasi sistem ketika koneksi internet terputus. Hasil pengujian HC-SR04 pada rentang 3–22 cm menghasilkan MAPE sebesar 0,58%. Pada pengujian kompensasi suhu dengan jarak referensi 15 cm dan rentang suhu 28–36 °C, MAPE menurun dari 0,79% menjadi 0,27%. Pengujian keluaran fuzzy menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan air dapat memengaruhi keluaran kendali pada beberapa kondisi ketinggian yang sama. Proteksi *dry run* menghentikan pompa ketika debit masuk berada di bawah 0,10 L/menit selama 4 s, sedangkan proteksi *overflow* menghentikan pompa ketika ketinggian air mencapai 22 cm. Ketika koneksi internet terputus, fungsi pengukuran, kendali, dan proteksi tetap dijalankan secara lokal oleh ESP32. Berdasarkan hasil tersebut, *prototype* yang dikembangkan dapat menjalankan fungsi pengukuran, kendali, proteksi, dan *monitoring* sesuai rancangan pada kondisi pengujian yang dilakukan.

KATA KUNCI : ESP32; *Internet of Things*; ketinggian air; logika fuzzy Mamdani; *monitoring* tandon.

ABSTRACT

Water level control and monitoring in a storage tank are required to observe water conditions and regulate the filling process according to system needs. Tank conditions change not only during the filling process but also due to water usage while the system is operating. This study aims to design and test an *Internet of Things*-based water tank level control and monitoring prototype using Mamdani fuzzy logic. The system uses an ESP32 as the main controller, an HC-SR04 sensor for water level measurement, a DS18B20 sensor for temperature compensation, and two YF-S201 sensors to measure the inlet and outlet flow rates. The fuzzy controller uses water level and water-use activity as two inputs to determine the pump control level through PWM. The system is also equipped with dry-run and overflow protection, while system condition data are displayed through Blynk. Tests were conducted on ultrasonic sensor readings, temperature compensation, fuzzy control output, protection functions, and system operation during an internet connection loss. The HC-SR04 test over a water level range of 3–22 cm produced a MAPE of 0.58%. In the temperature compensation test at a reference distance of 15 cm and a temperature range of 28–36 °C, the MAPE decreased from 0.79% to 0.27%. The fuzzy control output test showed that water-use activity affected the control output at several identical water level conditions. The dry-run protection stopped the pump when the inlet flow rate remained below 0.10 L/min for 4 s, while the overflow protection stopped the pump when the water level reached 22 cm. When the internet connection was disconnected, the measurement, control, and protection functions continued to operate locally on the ESP32. Based on these results, the developed prototype was able to perform the designed measurement, control, protection, and monitoring functions under the tested conditions.

KEYWORD ESP32; *Internet of Things*; Mamdani fuzzy logic; tank monitoring; water level.

1. PENDAHULUAN

Tandon air merupakan bagian penting dalam sistem penyediaan air karena berfungsi sebagai tempat penyimpanan sebelum air digunakan. Keberadaan tandon membantu menyediakan cadangan air sehingga kebutuhan pengguna tetap dapat dipenuhi ketika terjadi perubahan pada pasokan atau penggunaan air. Oleh karena itu, kondisi ketinggian air di dalam tandon perlu dipantau dan dikendalikan agar ketersediaan air tetap terjaga serta proses pengisian berlangsung sesuai kebutuhan.

Pengoperasian pompa pada tandon dapat dilakukan secara manual maupun secara otomatis berdasarkan kondisi ketinggian air. Pada pengoperasian manual, pengguna perlu melakukan pemeriksaan kondisi tandon secara langsung, sedangkan pada sistem otomatis proses pengisian dapat dijalankan berdasarkan batas ketinggian yang telah ditentukan [1] [2]. Namun, selama tandon digunakan, ketinggian air terus berubah akibat proses pengisian dan pemakaian. Kondisi tersebut membuat *monitoring* tetap diperlukan agar pengguna dapat mengetahui keadaan tandon tanpa harus melakukan pemeriksaan langsung. Oleh karena itu, sistem pengelolaan tandon tidak hanya memerlukan pengendalian pompa, tetapi juga *monitoring* kondisi air selama sistem bekerja.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan kondisi tandon dipantau dari jarak jauh melalui data sensor yang dikirimkan ke perangkat pengguna [3]. Pada penerapannya, sistem IoT pada tandon dapat digunakan untuk menampilkan informasi ketinggian air, memberikan notifikasi, serta melakukan pengendalian pompa melalui aplikasi atau perangkat pengguna [4] [5]. Dengan demikian, IoT dapat digunakan sebagai sarana *monitoring* dan akses pengguna terhadap sistem. Namun, penentuan kerja pompa tetap bergantung pada logika kendali yang diterapkan pada sistem.

Pada sistem kendali tandon, keputusan kerja pompa dapat ditentukan dengan mempertimbangkan lebih dari satu kondisi. Logika *fuzzy* dapat digunakan untuk mengolah beberapa masukan melalui himpunan linguistik dan aturan *IF-THEN* untuk menghasilkan keluaran kendali. Salah satu metode inferensi yang digunakan pada logika *fuzzy* adalah Mamdani. Pada metode ini, nilai masukan terlebih dahulu diubah ke dalam derajat keanggotaan, kemudian diproses melalui aturan yang telah ditentukan, dan hasil inferensi diubah menjadi nilai keluaran melalui proses *defuzzifikasi* [6] [7]. Pada penelitian ini, masukan yang digunakan adalah ketinggian air dan aktivitas penggunaan air pada jalur keluar tandon. Ketinggian air menunjukkan kondisi isi tandon, sedangkan aktivitas penggunaan air memberikan informasi mengenai pemakaian air yang sedang berlangsung. Kedua masukan tersebut kemudian digunakan untuk menentukan tingkat kendali pompa.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan logika *fuzzy* dan IoT pada sistem pengendalian tandon dengan konfigurasi yang berbeda. Al Hakim dkk. [8]

menggunakan kedalaman air dan posisi bukaan keran yang merepresentasikan konsumsi air sebagai masukan logika *fuzzy* Tsukamoto untuk menentukan PWM pompa melalui simulasi. Silalahi dkk. [9] menerapkan metode Mamdani pada sistem tangki berbasis IoT dengan ketinggian air dan kondisi air berdasarkan pembacaan TDS sebagai masukan pengendali. Parenreng dkk. [10] menggunakan sensor *water flow* pada aliran masuk dan keluar sebagai bagian dari sistem *monitoring* dan otomatisasi pompa berbasis IoT. Pada penelitian ini, logika *fuzzy* Mamdani diterapkan dengan ketinggian air dan aktivitas penggunaan air yang diperoleh dari debit pada jalur keluar sebagai dua masukan untuk menentukan tingkat kendali pompa melalui PWM.

Pengukuran ketinggian air menjadi bagian penting karena hasil pembacaan tersebut digunakan sebagai salah satu masukan pada proses kendali. Sensor ultrasonik menentukan jarak berdasarkan waktu tempuh gelombang suara dari sensor menuju permukaan air dan kembali ke sensor. Kecepatan rambat suara di udara dapat berubah akibat perubahan suhu sehingga nilai suhu perlu diperhatikan dalam perhitungan jarak [11] [12]. Jika perubahan suhu tidak diperhitungkan, nilai jarak yang diperoleh dapat mengalami penyimpangan. Pada penelitian ini, nilai suhu digunakan dalam perhitungan kecepatan rambat suara sebagai bagian dari kompensasi suhu pada pengukuran jarak.

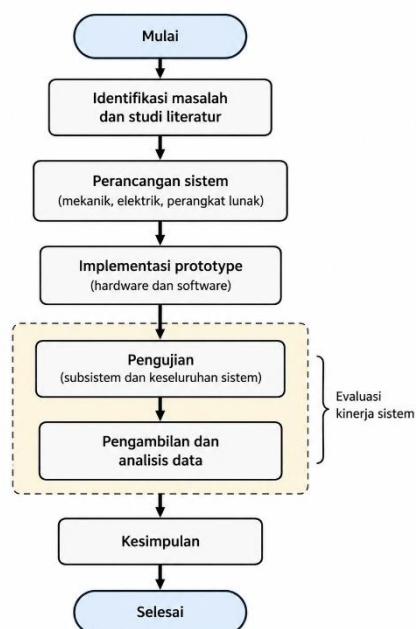
Selain ketinggian air, informasi aliran air digunakan untuk dua fungsi yang berbeda pada sistem. Sensor *water flow* pada jalur keluar digunakan untuk memperoleh aktivitas penggunaan air sebagai masukan kedua pengendali, sedangkan sensor *water flow* pada jalur masuk digunakan untuk mengetahui kondisi aliran air saat pompa bekerja. Sensor *water flow* dapat digunakan untuk memperoleh nilai debit dari aliran air yang melewati sensor [13]. Informasi aliran juga dapat digunakan sebagai dasar untuk mendeteksi kondisi *dry run*, yaitu ketika pompa bekerja tetapi aliran air tidak terdeteksi [14]. Pada penelitian ini, kondisi *dry run* dideteksi ketika debit pada jalur masuk berada di bawah batas yang telah ditentukan selama waktu tertentu. Selain itu, sistem dilengkapi proteksi *overflow* untuk mencegah air meluap ketika ketinggian air mencapai batas maksimum [15]. Pada penelitian ini, proteksi *overflow* dilakukan dengan menghentikan pompa ketika ketinggian air mencapai batas yang telah ditentukan.

Selain fungsi kendali dan proteksi tersebut, sistem juga menggunakan koneksi internet untuk mengirimkan data *monitoring* ke Blynk. Sistem berbasis ESP32 dapat dirancang agar proses otomatis tetap dijalankan secara lokal ketika akses ke Blynk tidak tersedia [16]. Pada penelitian ini, ketika koneksi internet terputus, *monitoring* melalui Blynk tidak tersedia, tetapi pembacaan sensor, pengolahan *fuzzy*, pengendalian pompa, dan proteksi tetap dijalankan secara lokal oleh ESP32.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada penerapan logika *fuzzy* Mamdani untuk

mengendalikan kerja pompa berdasarkan dua masukan, yaitu ketinggian air dan aktivitas penggunaan air. Nilai keluaran *fuzzy* digunakan untuk menentukan tingkat kendali pompa melalui PWM. Sistem juga dilengkapi dengan kompensasi suhu pada pengukuran ketinggian, proteksi *dry run* dan *overflow*, serta *monitoring* berbasis IoT melalui Blynk. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji *prototype* sistem kendali dan *monitoring* ketinggian air tandon berdasarkan rancangan tersebut. Manfaat penelitian ini adalah memberikan rancangan sistem yang dapat digunakan sebagai alternatif dalam pengelolaan ketinggian air tandon secara otomatis dengan mempertimbangkan kondisi ketinggian dan aktivitas penggunaan air.

2. METODE



Gambar 1. Tahapan Penelitian

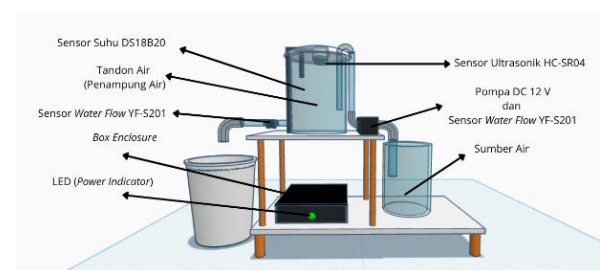
Penelitian ini menggunakan metode rekayasa dengan pendekatan eksperimental untuk mengembangkan *prototype* sistem kendali dan *monitoring* ketinggian air tandon. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur untuk menentukan kebutuhan sistem serta memperoleh dasar teori yang berkaitan dengan pengukuran ketinggian dan debit air, kendali pompa, logika *fuzzy* Mamdani, *Internet of Things* (IoT), dan proteksi sistem.

Setelah kebutuhan sistem ditentukan, tahap berikutnya adalah perancangan sistem yang mencakup perangkat mekanik, perangkat elektrik, perangkat lunak, dan kendali *fuzzy* Mamdani. Hasil perancangan kemudian diimplementasikan menjadi *prototype* dengan ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan sensor ketinggian, sensor suhu, dua sensor *water flow*, dan aktuator pompa. Program pada ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE, sedangkan

perancangan dan validasi logika *fuzzy* Mamdani dilakukan menggunakan MATLAB. Blynk digunakan sebagai antarmuka untuk *monitoring* kondisi sistem melalui perangkat pengguna.

Setelah *prototype* selesai diimplementasikan dan seluruh bagian sistem telah terintegrasi, tahap selanjutnya adalah pengujian. Pengujian meliputi pembacaan sensor ultrasonik, kompensasi suhu, pembacaan debit air, keluaran kendali *fuzzy* Mamdani, proteksi *dry run* dan *overflow*, serta operasi lokal ketika koneksi internet terputus. Data yang diperoleh dari setiap pengujian kemudian dianalisis berdasarkan parameter yang digunakan pada masing-masing pengujian sebagai dasar dalam menarik kesimpulan penelitian.

2.1. Perancangan Mekanik



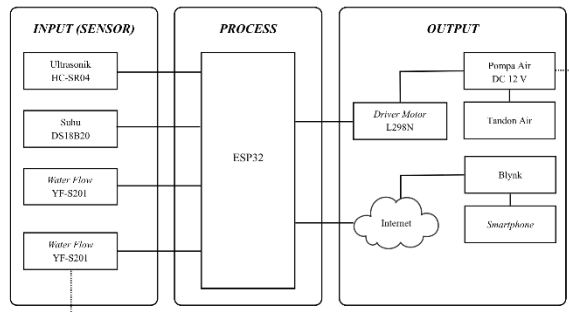
Gambar 2. Perancangan Mekanik

Sistem dirancang menggunakan dua wadah penampungan yang berfungsi sebagai sumber air dan tandon utama. Sensor HC-SR04 ditempatkan pada bagian atas tandon untuk mengukur ketinggian air, sedangkan sensor DS18B20 dipasang sekitar 3 cm dari HC-SR04 untuk membaca suhu udara di sekitar sensor sebagai nilai yang digunakan dalam kompensasi pengukuran jarak. Dua sensor YF-S201 ditempatkan pada jalur yang berbeda. Sensor pada jalur masuk digunakan untuk mendeteksi aliran sebagai bagian dari proteksi *dry run*, sedangkan sensor pada jalur keluar digunakan untuk memperoleh debit yang merepresentasikan aktivitas penggunaan air sebagai masukan kedua pengendali *fuzzy*. Pompa DC 12 V dikendalikan melalui L298N menggunakan sinyal PWM dari ESP32. Data kondisi sistem dikirimkan ke Blynk ketika koneksi internet tersedia, sedangkan proses pengukuran, kendali, dan proteksi dijalankan secara lokal pada ESP32.

2.2. Perancangan Elektrik

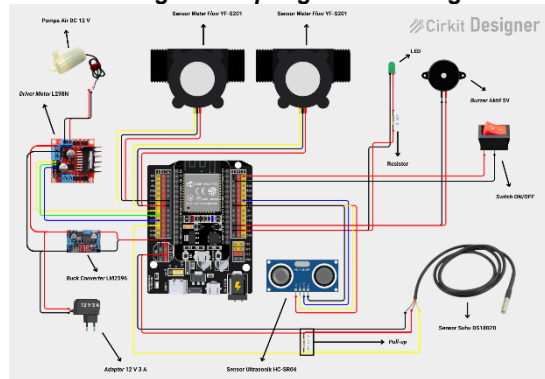
Kemudian, pada perancangan elektrik, ESP32 digunakan sebagai pusat pengolahan data dan kendali. HC-SR04 menggunakan GPIO 18 sebagai *trigger* dan GPIO 19 sebagai *echo*, sedangkan DS18B20 menggunakan GPIO 14 dengan resistor *pull-up* 4,7 kΩ. Kedua sensor YF-S201 dihubungkan ke GPIO 32 dan GPIO 33 untuk membaca pulsa aliran air. L298N menggunakan GPIO 25 sebagai ENA untuk menerima sinyal PWM serta GPIO 26 dan GPIO 27 sebagai IN1 dan IN2. Adaptor 12 V DC 3 A digunakan sebagai

sumber daya utama untuk pompa dan L298N, sedangkan LM2596 menurunkan tegangan menjadi 5 V untuk rangkaian kontrol dan sensor.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem

2.3. Perancangan Sampling dan Filtering



Gambar 4. Skematik Rangkaian

Pembacaan ketinggian air dan proses kendali diperbarui setiap 200 ms, yang setara dengan frekuensi 5 Hz. Pembacaan debit dari kedua sensor YF-S201 diperbarui setiap 1 s (1 Hz), sedangkan pembacaan suhu DS18B20 dilakukan setiap 2 s (0,5 Hz). Untuk mengurangi fluktuasi pembacaan, data ketinggian air dan debit diolah menggunakan *Exponential Moving Average* (EMA) [17]. Nilai hasil *filter* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$y_k = \alpha x_k + (1 - \alpha)y_{k-1} \quad (1)$$

dengan y_k merupakan nilai hasil *filter* saat ini, x_k merupakan nilai pembacaan saat ini, y_{k-1} merupakan nilai hasil *filter* sebelumnya, dan α merupakan koefisien EMA. Nilai α yang digunakan sebesar 0,05 untuk pembacaan ketinggian air dan 0,20 untuk pembacaan debit.

Debit air diperoleh dengan menghitung pulsa keluaran YF-S201 selama interval pembacaan. Jumlah pulsa dikonversi menjadi frekuensi, kemudian nilai debit dihitung menggunakan faktor konversi nominal YF-S201 sebesar 7,5 Hz/(L/menit) [18], sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$Q = \frac{f}{7.5} \quad (2)$$

dengan Q merupakan debit air dalam L/menit dan f merupakan frekuensi pulsa dalam Hz. Faktor 7,5 digunakan sebagai faktor konversi nominal YF-S201 dalam program.

Pengukuran ketinggian air dilakukan menggunakan HC-SR04 berdasarkan waktu tempuh gelombang ultrasonik dari sensor menuju permukaan air dan kembali ke sensor. Kecepatan rambat suara di udara dipengaruhi oleh suhu sehingga perubahan suhu perlu diperhitungkan dalam pengukuran jarak menggunakan sensor ultrasonik [11], [12]. Pada penelitian ini, DS18B20 ditempatkan sekitar 3 cm dari HC-SR04 untuk membaca suhu udara lokal di sekitar sensor. Nilai suhu tersebut digunakan dalam perhitungan kecepatan rambat suara sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3) [11], [12].

$$v(T) = 331.4 + 0.6T \quad (3)$$

dengan $v(T)$ merupakan kecepatan rambat suara dalam m/s dan T merupakan suhu udara dalam °C.

Nilai kecepatan rambat suara tersebut kemudian digunakan untuk menghitung jarak sensor terhadap permukaan air menggunakan Persamaan (4).

$$d = \frac{t \cdot v(T)}{20000} \quad (4)$$

dengan d merupakan jarak sensor terhadap permukaan air dalam cm dan t merupakan waktu tempuh gelombang ultrasonik dalam μ s. Faktor 20000 berasal dari pembagian waktu tempuh menjadi dua karena gelombang menempuh lintasan pergi-pulang serta konversi satuan dari m/s dan μ s menjadi cm. Jarak yang diperoleh kemudian dikonversi menjadi ketinggian air berdasarkan selisih antara jarak referensi sensor ke dasar tandon sebesar 25 cm dan jarak sensor terhadap permukaan air. Waktu tunggu pembacaan sinyal *echo* dibatasi hingga 30 ms.

Kemudian, pada bagian proteksi, proteksi *dry run* menggunakan pembacaan sensor YF-S201 pada jalur masuk untuk mengetahui kondisi aliran ketika pompa bekerja. Kondisi *dry run* ditetapkan apabila debit masuk berada di bawah 0,10 L/menit secara terus-menerus selama 4 s. Apabila kondisi tersebut terpenuhi, ESP32 menghentikan pompa. Adapun proteksi *overflows* diterapkan berdasarkan ketinggian air, yaitu dengan menghentikan pompa ketika ketinggian air mencapai atau melebihi 22 cm.

2.4. Perancangan Fuzzy Mamdani

Pengendalian pompa dirancang menggunakan logika fuzzy Mamdani dengan dua masukan, yaitu ketinggian air dan aktivitas penggunaan air. Ketinggian air menunjukkan kondisi isi tandon, sedangkan aktivitas penggunaan air diperoleh dari debit pada jalur keluar tandon. Kedua masukan tersebut digunakan secara bersamaan dalam proses inferensi untuk menentukan tingkat kendali pompa.

Masukan ketinggian air memiliki rentang 0–25 cm dan dibagi menjadi lima himpunan *fuzzy*, yaitu Sangat Rendah, Rendah, Sedang, Tinggi, dan Sangat Tinggi. Masukan aktivitas penggunaan air dibagi menjadi dua himpunan, yaitu Tidak Dipakai dan Sedang Dipakai.

Tabel 1. Fungsi Keanggotaan Ketinggian Air

Himpunan	Rentang	Parameter
Sangat Rendah	0–8 cm	[0, 0, 4, 8]
Rendah	4–13 cm	[4, 8, 13]
Sedang	8–18 cm	[8, 13, 18]
Tinggi	13–21 cm	[13, 18, 21]
Sangat Tinggi	18–25 cm	[18, 21, 25, 25]

Tabel 2. Fungsi Keanggotaan Aktivitas Penggunaan Air

Himpunan	Rentang	Parameter
Tidak Dipakai	0–0,6 L/menit	[0, 0, 0,2, 0,6]
Sedang Dipakai	0,4–2 L/menit	[0,4, 0,8, 2, 2]

Keluaran *fuzzy* berupa tingkat kendali pompa dengan rentang 0–255. Variabel keluaran dibagi menjadi lima himpunan, yaitu Mati, PWM Sangat Rendah, PWM Rendah, PWM Tinggi, dan PWM Sangat Tinggi. Ini menunjukkan tingkat sinyal kendali PWM yang dihasilkan oleh sistem.

Tabel 3. Fungsi Keanggotaan Tingkat Kendali Pompa

Himpunan	Rentang	Parameter
Mati	0–50	[-50, 0, 50]
PWM Sangat Rendah	50–110	[50, 80, 110]
PWM Rendah	90–160	[90, 125, 160]
PWM Tinggi	140–210	[140, 175, 210]
PWM Sangat Tinggi	190–255	[190, 230, 255, 255]

Hubungan antara kedua masukan dan keluaran ditentukan menggunakan aturan *IF-THEN*. Aturan disusun berdasarkan kondisi ketinggian air dan aktivitas penggunaan air sehingga kombinasi kedua masukan dapat menghasilkan tingkat kendali pompa yang berbeda. Proses inferensi menggunakan metode Mamdani, sedangkan nilai keluaran akhir diperoleh melalui proses *defuzzifikasi* menggunakan metode *centroid* dengan Persamaan (5).

$$Z^* = \frac{\sum z\mu(z)}{\sum \mu(z)} \quad (5)$$

dengan Z^* sebagai nilai keluaran hasil *defuzzifikasi* dan $\mu(z)$ sebagai derajat keanggotaan keluaran hasil agregasi.

Tabel 4. Basis Aturan Fuzzy Mamdani

Aturan	Ketinggian Air	Aktivitas Penggunaan Air	Tingkat Kendali Pompa
R1	Sangat Rendah	Tidak Dipakai	PWM Sangat Tinggi
R2	Sangat Rendah	Sedang Dipakai	PWM Sangat Tinggi
R3	Rendah	Tidak Dipakai	PWM Tinggi

R4	Rendah	Sedang Dipakai	PWM Sangat Tinggi
R5	Sedang	Tidak Dipakai	PWM Rendah
R6	Sedang	Sedang Dipakai	PWM Tinggi
R7	Tinggi	Tidak Dipakai	PWM Sangat Rendah
R8	Tinggi	Sedang Dipakai	PWM Rendah
R9	Sangat Tinggi	Tidak Dipakai	Mati
R10	Sangat Tinggi	Sedang Dipakai	Mati

Nilai keluaran hasil *defuzzifikasi* selanjutnya digunakan untuk menentukan sinyal PWM yang diterapkan pada pompa. Nilai keluaran *fuzzy* di bawah 25 menghasilkan PWM 0, sedangkan nilai keluaran pada rentang 25–255 dipetakan ke rentang PWM 166–255 dengan persamaan (6).

$$PWM = 166 + \frac{(Z - 25)(255 - 166)}{255 - 25} \quad (6)$$

dengan Z sebagai nilai keluaran hasil *defuzzifikasi*.

Implementasi logika *fuzzy* Mamdani pada ESP32 diverifikasi dengan membandingkan keluaran hasil perhitungan pada ESP32 terhadap keluaran yang diperoleh dari MATLAB menggunakan kombinasi nilai masukan yang sama. Perbandingan dilakukan untuk memastikan bahwa fungsi keanggotaan, aturan *fuzzy*, proses inferensi, dan *defuzzifikasi* yang diimplementasikan pada ESP32 menghasilkan keluaran yang sesuai dengan rancangan pada aplikasi MATLAB.

2.5. Pengujian Sistem

Pengujian pembacaan sensor ultrasonik dilakukan dengan membandingkan hasil HC-SR04 terhadap ketinggian air referensi pada sembilan titik, yaitu 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, dan 22 cm. Pengujian kompensasi suhu dilakukan pada jarak referensi 15 cm dengan suhu 28–36 °C. Kondisi tanpa kompensasi menggunakan suhu tetap 27 °C, sedangkan kondisi dengan kompensasi menggunakan suhu hasil pembacaan DS18B20. Penyimpangan hasil pengukuran dianalisis menggunakan APE dan MAPE.

Pengujian keluaran kendali *fuzzy* Mamdani dilakukan menggunakan beberapa kombinasi ketinggian air dan aktivitas penggunaan air. Nilai keluaran *fuzzy* dan PWM implementasi dicatat untuk melihat perubahan keputusan kendali berdasarkan kedua masukan. Implementasi logika *fuzzy* pada ESP32 juga diverifikasi dengan membandingkan keluarannya terhadap hasil perhitungan MATLAB menggunakan kombinasi masukan yang sama.

Pengujian proteksi *dry run* dilakukan dengan menghentikan suplai air pada jalur masuk ketika pompa bekerja hingga debit berada di bawah 0,10 L/menit selama 4 s. Pengujian proteksi *overflow* dilakukan dengan menjalankan pompa hingga ketinggian air mencapai batas 22 cm. Kedua pengujian dilakukan pada mode otomatis dan manual.

Pengujian operasi lokal saat koneksi internet terputus dilakukan pada kondisi internet terhubung, terputus, dan terhubung kembali. Pada setiap kondisi diamati fungsi kendali dan proteksi pada ESP32 serta ketersediaan *monitoring* melalui Blynk. Penyimpangan hasil pengukuran sensor terhadap nilai referensi dihitung menggunakan *Absolute Percentage Error* (APE), sedangkan rata-rata penyimpangan seluruh data dihitung menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) [19].

$$APE_i = \left| \frac{X - X_i}{X} \right| \times 100\% \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n APE_i \quad (8)$$

dengan X adalah nilai referensi, X_i adalah hasil pengukuran pada pengujian ke- i , dan n adalah jumlah data.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Realisasi Sistem



Gambar 5. Hasil Realisasi Mekanik

Prototype yang direalisasikan terdiri atas tandon utama, wadah sumber air, rangkaian kontrol, sensor pengukuran, pompa, dan saluran *output*. Rangkaian kontrol ditempatkan pada *box enclosure* untuk mengurangi risiko terkena percikan air. Struktur mekanik menggunakan dua tingkat penyangga sehingga wadah sumber berada di bagian bawah dan tandon utama berada pada posisi lebih tinggi.

Adapun sistem *monitoring* direalisasikan menggunakan Blynk sebagai antarmuka untuk menampilkan data pengukuran dan kondisi sistem. Informasi yang ditampilkan meliputi ketinggian air, suhu, debit pada jalur masuk dan keluar, nilai keluaran *fuzzy*, PWM pompa, mode operasi, serta status proteksi *dry run* dan *overflow*. Tampilan sistem *monitoring* pada Blynk ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan Sistem Monitoring pada Blynk

3.2. Hasil Pengujian Pembacaan Sensor Ultrasonik

Pengujian pembacaan sensor ultrasonik dilakukan pada sembilan titik ketinggian air antara 3–22 cm dengan membandingkan hasil pembacaan HC-SR04 terhadap nilai referensi. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Pembacaan Sensor Ultrasonik

Tinggi Air Referensi (cm)	Tinggi Terukur Sensor (cm)	APE (%)
3	2,98	0,67
5	4,93	1,40
8	7,92	1,00
10	9,95	0,50
13	12,97	0,23
15	14,94	0,40
18	18,04	0,22
20	20,10	0,50
22	21,93	0,32
MAPE (%)		0,58

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, pembacaan HC-SR04 menghasilkan nilai MAPE sebesar 0,58%. Nilai APE terbesar terjadi pada ketinggian referensi 5 cm sebesar 1,40%, sedangkan APE terendah sebesar 0,22% terjadi pada ketinggian 18 cm. Selisih absolut antara pembacaan sensor dan nilai referensi pada seluruh titik pengujian berada pada rentang 0,02–0,10 cm dengan rata-rata sebesar 0,058 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada rentang pengujian 3–22 cm, pembacaan HC-SR04 memiliki penyimpangan yang rendah terhadap nilai referensi.

3.3. Hasil Pengujian Kompensasi Suhu pada Jarak Referensi 15 cm

Pengujian kompensasi suhu dilakukan pada jarak referensi 15 cm dengan variasi suhu 28–36 °C. Pada kondisi tanpa kompensasi, perhitungan jarak menggunakan suhu tetap 27 °C, sedangkan pada kondisi dengan kompensasi digunakan suhu hasil pembacaan DS18B20. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kompensasi Suhu pada Jarak 15 cm

Suhu (°C)	Jarak Aktual (cm)	Tanpa Komp. (cm)	APE (%)	Dengan Komp. (cm)	APE (%)
28	15	15,04	0,27	15,01	0,07
29	15	15,09	0,60	15,05	0,33
30	15	15,09	0,60	15,04	0,27
31	15	15,12	0,80	15,06	0,40
32	15	15,13	0,87	15,05	0,33
33	15	15,11	0,73	15,01	0,07
34	15	15,16	1,07	15,04	0,27
36	15	15,21	1,40	15,06	0,40
MAPE (%)		0,79		0,27	

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6, MAPE pembacaan tanpa kompensasi sebesar 0,79%, sedangkan dengan kompensasi sebesar 0,27%. Nilai APE dengan kompensasi juga lebih rendah pada seluruh suhu yang diuji. Selisih absolut terhadap jarak referensi tanpa kompensasi berada pada rentang 0,04–0,21 cm dengan rata-rata 0,119 cm, sedangkan dengan kompensasi berada pada rentang 0,01–0,06 cm dengan rata-rata 0,040 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan suhu aktual dalam perhitungan kecepatan rambat suara dapat mengurangi penyimpangan pembacaan pada jarak referensi 15 cm dan rentang suhu 28–36 °C yang diuji.

3.4. Hasil Pengujian Keluaran Kendali Fuzzy Mamdani

Pengujian keluaran kendali *fuzzy* Mamdani dilakukan menggunakan beberapa kombinasi ketinggian air dan aktivitas penggunaan air untuk mengetahui perubahan keluaran berdasarkan kedua masukan. Nilai hasil *defuzzifikasi* dan PWM yang diterapkan pada pompa dicatat pada setiap kondisi pengujian. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 7.

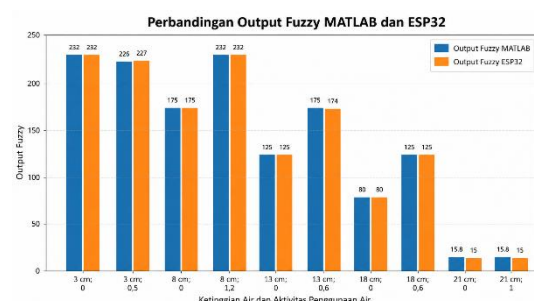
Tabel 7. Hasil Pengujian Keluaran Kendali Fuzzy Mamdani

Ketinggian Air (cm)	Aktivitas Penggunaan Air (L/menit)	Keluaran Fuzzy	PWM Aktual	Tingkat kendali
3	0	232	246	PWM Sangat Tinggi
	0.5	227	244	PWM Sangat Tinggi
8	0	175	224	PWM Tinggi
	1.2	232	246	PWM Sangat Tinggi
13	0	125	204	PWM Rendah
	0.6	174	223	PWM Tinggi
18	0	80	187	PWM Sangat Rendah
	0.6	125	204	PWM Rendah
21	0	15	0	Mati
	1	15	0	Mati

Hasil pada Tabel 7 menunjukkan bahwa keluaran kendali berubah sesuai kombinasi kedua masukan. Pada ketinggian 8 cm, keluaran *fuzzy* meningkat dari 175 menjadi 232 ketika aktivitas penggunaan air berubah dari 0 menjadi 1,2 L/menit. Perubahan serupa terlihat pada ketinggian 13 cm, yaitu dari 125 menjadi 174, serta pada ketinggian 18 cm dari 80 menjadi 125. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan air dapat memengaruhi keputusan kendali pada kondisi ketinggian air yang sama.

Pada ketinggian 3 cm, keluaran tetap berada pada tingkat PWM Sangat Tinggi untuk kedua kondisi penggunaan air, sedangkan pada ketinggian 21 cm keluaran *fuzzy* sebesar 15 menghasilkan PWM 0. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh masukan aktivitas penggunaan air bergantung pada kombinasi fungsi keanggotaan dan aturan *fuzzy* yang aktif pada masing-masing kondisi.

Implementasi perhitungan *fuzzy* pada ESP32 juga diverifikasi dengan membandingkan nilai keluarannya terhadap hasil MATLAB menggunakan sepuluh kombinasi masukan yang sama. Enam kondisi menghasilkan nilai keluaran yang sama. Empat kondisi lainnya menunjukkan perbedaan, yaitu 226 dan 227 pada masukan 3 cm dan 0,5 L/menit, 175 dan 174 pada masukan 13 cm dan 0,6 L/menit, serta 15,8 dan 15 pada masukan 21 cm dengan aktivitas penggunaan air 0 L/menit dan 1 L/menit. Selisih keluaran pada keempat kondisi tersebut berada pada rentang 0,8–1 dan tidak mengubah tingkat kendali yang diterapkan pada pompa.

**Gambar 7. Perbandingan Keluaran Fuzzy MATLAB dan ESP32**

3.5. Hasil Pengujian Proteksi Dry run dan Overflow

Pengujian proteksi dilakukan untuk mengetahui respons sistem terhadap kondisi *dry run* dan *overflow*. Proteksi *dry run* diuji dengan menghentikan suplai air pada jalur masuk ketika pompa bekerja, sedangkan proteksi *overflow* diuji dengan menjalankan pompa hingga ketinggian air mencapai batas yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan pada mode otomatis dan manual.

Tabel 8. Hasil Pengujian Proteksi Dry run

Mode	Percobaan	Debit (L/menit)	Waktu Deteksi (s)	Kondisi Pompa
Otomatis	1	0,07	4	Berhenti
	2	0,09	4	Berhenti
	3	0,07	4	Berhenti
Manual	1	0,09	4	Berhenti
	2	0,07	4	Berhenti
	3	0,07	4	Berhenti

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketika debit pada jalur masuk berada di bawah ambang 0,10 L/menit selama 4 s, sistem menghentikan pompa pada mode otomatis maupun manual. Debit yang terukur pada kondisi pengujian berada pada rentang 0,07–0,09 L/menit. Pada seluruh percobaan, pompa berhenti setelah kondisi *dry run* terdeteksi sesuai waktu yang telah ditetapkan.

Tabel 9. Hasil Pengujian Proteksi Overflow

Mode	Percobaan	Ketinggian Air (cm)	Kondisi Awal	Kondisi Akhir
Otomatis	1	22,33	Nyala	Mati
	2	22,09	Nyala	Mati
	3	22,18	Nyala	Mati
Manual	1	22,03	Nyala	Mati
	2	22,17	Nyala	Mati
	3	22,07	Nyala	Mati

Pada pengujian proteksi *overflow*, pompa dihentikan ketika ketinggian air mencapai batas 22 cm. Ketinggian yang tercatat saat pompa berhenti berada pada rentang 22,03–22,33 cm pada pengujian mode otomatis dan manual. Seluruh pengujian menunjukkan bahwa pompa berhenti setelah batas *overflow* tercapai.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa logika proteksi yang diterapkan dapat menghentikan pompa sesuai kondisi *dry run* dan batas ketinggian yang telah ditentukan pada skenario pengujian.

3.6. Hasil Pengujian Operasi Lokal saat Koneksi Internet Terputus

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi fungsi kendali, proteksi, dan *monitoring* ketika koneksi internet tersedia, terputus, dan kembali terhubung. Pada setiap kondisi diamati apakah proses kendali dan proteksi tetap dijalankan oleh ESP32 serta apakah data *monitoring* dapat ditampilkan melalui Blynk.

Tabel 10. Hasil Pengujian Operasi Lokal saat Koneksi Internet Terputus

Kondisi Koneksi	Kendali dan Proteksi	Monitoring Blynk	Kondisi Koneksi
Terhubung	Berjalan	Aktif	Terhubung
Terputus	Berjalan	Tidak aktif	Terputus
Terhubung kembali	Berjalan	Aktif kembali	Terhubung kembali

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketika koneksi internet terputus, *monitoring* melalui Blynk tidak tersedia, sedangkan proses pembacaan sensor, pengolahan *fuzzy*, pengendalian pompa, dan proteksi

tetap dijalankan secara lokal oleh ESP32. Setelah koneksi internet kembali tersedia, *monitoring* melalui Blynk kembali aktif tanpa menghentikan proses kendali lokal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa gangguan koneksi internet pada skenario pengujian tidak menghentikan fungsi kendali dan proteksi yang dijalankan pada ESP32.

3.7. Pembahasan

Temuan utama pada pengujian kendali *fuzzy* menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan air dapat memengaruhi keluaran kendali pada kondisi ketinggian air yang sama. Pengaruh tersebut tidak muncul pada seluruh kondisi, sehingga aktivitas penggunaan air tidak menggantikan peran ketinggian air sebagai dasar kendali, tetapi memberikan informasi tambahan ketika sistem menentukan tingkat PWM pompa. Hasil ini menunjukkan fungsi dari penggunaan dua masukan pada rancangan yang diterapkan, yaitu ketinggian air merepresentasikan kondisi isi tandon, sedangkan aktivitas penggunaan air merepresentasikan kondisi pemakaian air yang sedang berlangsung. Pendekatan tersebut memiliki kesamaan dengan Al Hakim dkk. [8] yang menggunakan variabel konsumsi air sebagai salah satu masukan kendali, tetapi penelitian tersebut menggunakan metode Tsukamoto melalui simulasi. Sementara itu, Silalahi dkk. [9] menggunakan Mamdani dengan ketinggian air dan TDS, sehingga masukan keduanya merepresentasikan kondisi kualitas air, bukan aktivitas penggunaan air. Pada penelitian ini, informasi penggunaan diperoleh langsung dari debit pada jalur keluar dan digunakan bersama ketinggian air pada implementasi *prototype*. Kesesuaian keluaran antara MATLAB dan ESP32 menunjukkan bahwa karakter keputusan yang dirancang pada sistem *fuzzy* dapat dipertahankan ketika diterapkan pada mikrokontroler.

Kualitas masukan ketinggian juga memengaruhi proses kendali karena nilai tersebut digunakan langsung dalam inferensi *fuzzy*. Pengujian menunjukkan bahwa kesalahan pembacaan tidak membentuk kecenderungan yang meningkat terhadap ketinggian air, sedangkan penggunaan kompensasi suhu memberikan penurunan penyimpangan yang konsisten pada kondisi pengujian. Hal tersebut sesuai dengan prinsip pengukuran ultrasonik, yaitu perubahan suhu memengaruhi kecepatan rambat suara di udara [11], [12]. Dengan demikian, kompensasi suhu pada penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai pendukung kualitas pengukuran daripada sebagai bagian utama dari metode kendali.

Proteksi *dry run* dan *overflow* memberikan batas terhadap keputusan kendali pompa. Artinya, keluaran *fuzzy* menentukan tingkat kendali selama kondisi sistem masih berada dalam batas operasi yang ditetapkan, sedangkan kondisi proteksi dapat menghentikan pompa tanpa bergantung pada besar keluaran *fuzzy* maupun mode operasi yang digunakan. Penggunaan informasi aliran untuk mendeteksi *dry run* sejalan dengan penerapan pada penelitian sebelumnya [14]. Pada sisi komunikasi, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa

Blynk tidak menjadi bagian dari proses pengambilan keputusan kendali. Koneksi internet digunakan untuk *monitoring*, sedangkan pengukuran, pengolahan *fuzzy*, kendali, dan proteksi diproses secara lokal pada ESP32. Pemisahan ini membuat fungsi kendali tetap berjalan ketika akses *monitoring* melalui internet tidak tersedia [16].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan *prototype* sistem kendali dan *monitoring* ketinggian air tandon berbasis *Internet of Things* dengan logika *fuzzy* Mamdani menggunakan ESP32. Sistem menggunakan ketinggian air dan aktivitas penggunaan air sebagai dua masukan untuk menentukan tingkat kendali pompa melalui PWM, serta dilengkapi kompensasi suhu, pengukuran aliran, proteksi *dry run* dan *overflow*, serta *monitoring* melalui Blynk. Pengujian pembacaan HC-SR04 pada rentang 3–22 cm menghasilkan MAPE sebesar 0,58%. Pada pengujian kompensasi suhu dengan jarak referensi 15 cm dan rentang suhu 28–36 °C, MAPE menurun dari 0,79% menjadi 0,27%. Pengujian keluaran *fuzzy* menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan air dapat memengaruhi keluaran kendali pada beberapa kondisi ketinggian yang sama sesuai aturan yang diterapkan. Proteksi *dry run* menghentikan pompa ketika debit masuk berada di bawah 0,10 L/menit selama 4 s, sedangkan proteksi *overflow* menghentikan pompa ketika ketinggian air mencapai batas 22 cm. Ketika koneksi internet terputus, fungsi pengukuran, kendali, dan proteksi tetap dijalankan secara lokal oleh ESP32, sedangkan *monitoring* melalui Blynk kembali tersedia setelah koneksi tersambung kembali.

Penerapan rancangan ini berpotensi mendukung pengelolaan tandon air melalui pengendalian pompa berdasarkan kondisi ketinggian dan penggunaan air, serta *monitoring* kondisi sistem melalui Blynk. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada pengujian kompensasi suhu yang dilakukan pada satu jarak referensi, pengujian kendali yang masih difokuskan pada keluaran *fuzzy* dan PWM berdasarkan kombinasi masukan yang diuji, serta pengujian yang masih dilakukan pada skala *prototype*. Penelitian selanjutnya dapat memperluas pengujian kompensasi suhu pada beberapa jarak, mengamati perubahan ketinggian air dan PWM selama proses pengisian dan penggunaan air, serta menguji sistem pada tandon dengan kapasitas yang lebih besar.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada kedua orang tua dan keluarga atas doa serta dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ibu Desmira, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Mohammad Fatkhurrohman, S.Pd., S.Kom., M.Pd. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Program Studi

Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Rivaldi dan F. Said, "IoT-Based Integrated *Monitoring* System for Household Water Level and Usage Tracking," *Journal Innovations Computer Science*, vol. 4, no. 2, hlm. 185–195, Nov 2025, doi:10.56347/jics.v4i2.317.
- [2] K. M. Abubeker dan A. Nuthalapati, "Cloud Based LoRaWAN Enabled Water Tank Automation Framework," dalam *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2025, hlm. 768–775. doi: 10.1016/j.procs.2025.01.037.
- [3] F. Jan, N. Min-Allah, S. Saeed, S. Z. Iqbal, dan R. Ahmed, "IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks," 1 Februari 2022, MDPI. doi: 10.3390/w14030309.
- [4] L. B. Amertha, R. S. Hartati, dan M. Sudarma, "Sistem *Monitoring* dan Kontrol Tangki Air Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Bot Telegram," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 2, hlm. 161, Des 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i02.p02.
- [5] M. A. Hasanah dan M. J. Che Soh, "Solar Powered Water Tank Level *Monitoring* System with IoT," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, no. 2, hlm. 1–7, 2024, doi: 10.30880/eeec.2024.05.02.001.
- [6] A. K. Varshney dan V. Torra, "Literature Review of the Recent Trends and Applications in Various *Fuzzy* Rule-Based Systems," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 25, no. 6, hlm. 2163–2186, Sep 2023, doi:10.1007/s40815-023-01534-w.
- [7] R. Saatchi, "Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation," *Information (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, Okt 2024, doi: 10.3390/info15100656.
- [8] V. G. Al Hakim, N. Yuniarti, dan H. Haryanto, "Fuzzy Logic-Based Energy Optimization in Water Pumping: Towards Sustainable Development Goals," *TEM Journal*, vol. 13, no. 1, hlm. 431–439, 2024, doi: 10.18421/TEM131-45.
- [9] L. M. Silalahi, I. U. V. Simanjuntak, M. Maharani, dan R. A. P. Ramdani, "Sistem Kendali *Fuzzy* Mamdani Berbasis IoT untuk Optimalisasi Tangki Air," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 4, no. 6, hlm. 233–245, Des 2024, doi: 10.52436/1.jpti.458.
- [10] J. M. Parenreng, M. S. Lamada, N. I. H. Baktiar, F. Adibah, dan A. A. N. Risal, "Smart Water Tank for Control and *Monitoring* Based on IoT Technology," *Internet of Things and Artificial*

- Intelligence Journal*, vol. 3, no. 2, hlm. 204–219, Mei 2023, doi: 10.31763/iota.v3i2.626.
- [11] F. L. Theodoro, A. C. Sanches, T. A. C. da Cruz, R. C. Santos, D. L. Flumignan, dan F. L. F. de Jesus, “Low-cost ultrasonic sensors for in-field experimentation data collection,” *Ciencia e Agrotecnologia*, vol. 47, 2023, doi: 10.1590/1413-7054202347013422.
- [12] T. Kim, J. Kim, dan E. Kim, “Ultrasonic Sensor-based Water Leveling for Three-dimensional Water Phantom: *Prototype Development*,” *J. Med. Phys.*, vol. 49, no. 3, hlm. 387–393, 2024, doi: 10.4103/jmp.jmp_60_24.
- [13] A. S. Khatatbeh dan Y.-O. Kim, “Accuracy assessment and error decomposition of internet of things sensor: Low-flow conditions in Dorimcheon stream,” *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 16, no. 3, hlm. 100595, Sep 2023, doi: 10.1016/j.jrras.2023.100595.
- [14] M. A. Arrosad dkk., “Sistem *Monitoring* Kualitas Air dan Kontrol Pompa Berbasis IoT dengan Proteksi Dry-Run,” *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Robotika*, vol. 8, no. 1, hlm. 23–35, Jun 2026, doi:10.33005/jifti.v8i1.222.
- [15] S. A. Palermo dkk., “Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview,” 1 Agustus 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22166225.
- [16] A. C. Handinata dan A. Zuhriya Khoirunnisaa, “Implementasi Sistem Hybrid *Monitoring* dan Penstabilan pH Air Tambak Udang Vaname Berbasis ESP32 dengan Metode *Fuzzy Mamdani*,” *JURNAL SURYA TEKNIKA*, vol. 13, no. 1, hlm. 160–167, Jun 2026, doi: 10.37859/jst.v13i1.11479.
- [17] I. Mahfudi, M. S. Sujai, R. I. Syahputra, dan D. Wirayuda, “Optimasi sistem deteksi kebocoran pipa distribusi air bersih secara real-time menggunakan LoRa Ebyte E220-400T22D dan visualisasi webserver,” *JURNAL ELTEK*, vol. 23, no. 2, hlm. 72–80, Okt 2025, doi:10.33795/eltek.v23i2.8683.
- [18] S. Ardhi, T. Putra Gunawan, J. Prajetno Sugiono, R. Alexandro Harianto, dan F. Alif Muhammad, “Pembuatan Prototipe Sistem Berbasis IoT untuk *Monitoring* dan Estimasi Biaya Konsumsi Air di Kos-kosan,” dalam *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan XII 2024*, 2024, hlm. 1–14.
- [19] I. N. Aziis, F. Hadary, dan A. M. Ashari, “Rancang Bangun Smart Greenhouse Untuk Tanaman Jahe Berbasis Internet of Things (IoT),” *COMSERVA: Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, vol. 4, no. 7, hlm. 2203–2217, Nov 2024, doi:10.59141/comserva.v4i7.2609.