

Sistem Pengendali PH Dan Suhu Pada Kolam Ikan Lele Dengan Metode Logika Fuzzy

Wisnu¹, Oktriza Melfazen², Anang Habibi³

^{1,2,3} Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang
JL. MT. HARYONO 193 MALANG

wisnu050799@gmail.com, oktrizamelfazen@unisma.ac.id, ananghabibi@unisma.ac.id

Abstract

Water quality is a critical factor in catfish (*Clarias sp.*) cultivation, particularly pH and temperature stability. Fluctuations in these parameters can cause stress and reduce fish survival rates. This study develops an automatic water quality control system based on Internet of Things (IoT) and Mamdani fuzzy logic using an ESP32 microcontroller. The system utilizes pH, DS18B20 temperature, and water level sensors as inputs, with pH adjustment pumps, a heater, and inlet-outlet valves as actuators. The fuzzy logic controller determines control actions through fuzzification, inference, and defuzzification processes, while pond conditions are monitored via Arduino IoT Cloud. Experimental results show that all sensors achieve measurement errors below 10% based on Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The system successfully maintains water pH at 7 ± 0.5 and temperature at $26.5^\circ\text{C} \pm 2.5^\circ\text{C}$, with a response time of 1–2 seconds. These results indicate that the proposed system is effective and reliable for real-time water quality control in catfish ponds.

Keywords: IoT, fuzzy logic, catfish ponds, water quality, ESP32.

Abstraksi

Kualitas air merupakan faktor penting dalam budidaya ikan lele, terutama parameter pH dan suhu. Perubahan pH dan suhu yang tidak terkendali dapat menyebabkan stres dan menurunkan tingkat kelangsungan hidup ikan. Penelitian ini merancang sistem pengendalian pH dan suhu kolam ikan lele berbasis Internet of Things (IoT) dan logika fuzzy Mamdani menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem menggunakan sensor pH, sensor suhu DS18B20, dan sensor level air sebagai input, serta pompa pH up, pompa pH down, heater, dan valve air sebagai aktuator. Proses pengendalian dilakukan melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, dengan pemantauan kondisi kolam secara daring melalui Arduino IoT Cloud. Hasil pengujian menunjukkan seluruh sensor memiliki nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) di bawah 10%. Sistem mampu mempertahankan pH air pada nilai $7 \pm 0,5$ dan suhu air pada $26,5^\circ\text{C} \pm 2,5^\circ\text{C}$ dengan waktu respon 1–2 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang efektif dan andal dalam menjaga kestabilan kualitas air kolam ikan lele secara real-time.

Kata Kunci: IoT, fuzzy logic, budidaya ikan lele, kualitas air, ESP32.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk di Indonesia yang diproyeksikan mencapai 281,6 juta jiwa pada tahun 2024 [1].

mendorong kebutuhan pangan nasional, khususnya pemenuhan sumber protein hewani. Dalam sektor perikanan budidaya, ikan lele (*Clarias sp.*) menjadi salah satu komoditas strategis karena memiliki tingkat produksi tinggi, siklus panen relatif singkat, serta daya adaptasi yang baik terhadap lingkungan. Produksi perikanan budidaya nasional menunjukkan bahwa komoditas ikan lele secara konsisten menghasilkan lebih dari satu juta ton per tahun pada periode 2017–2020 [2].

Meskipun demikian, sebagian besar produksi tersebut masih bergantung pada sistem budidaya konvensional yang menggunakan kolam statis dengan proses pemantauan dan pengelolaan yang

dilakukan secara manual. Sistem budidaya konvensional memiliki keterbatasan dalam menjaga stabilitas lingkungan kolam. Akumulasi sisa pakan dan limbah metabolik dapat menurunkan kualitas air, sementara keterlambatan dalam pengambilan keputusan sering kali menyebabkan pemberian pakan yang tidak efisien dan meningkatnya risiko serangan penyakit. Kondisi ini berdampak langsung pada menurunnya laju pertumbuhan ikan, meningkatnya angka mortalitas, serta potensi kegagalan panen. Oleh karena itu, penerapan teknologi dalam konsep smart aquaculture menjadi alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan adaptivitas sistem budidaya terhadap perubahan lingkungan. Keberhasilan budidaya ikan lele sangat dipengaruhi oleh kualitas air, terutama parameter pH dan suhu [3].

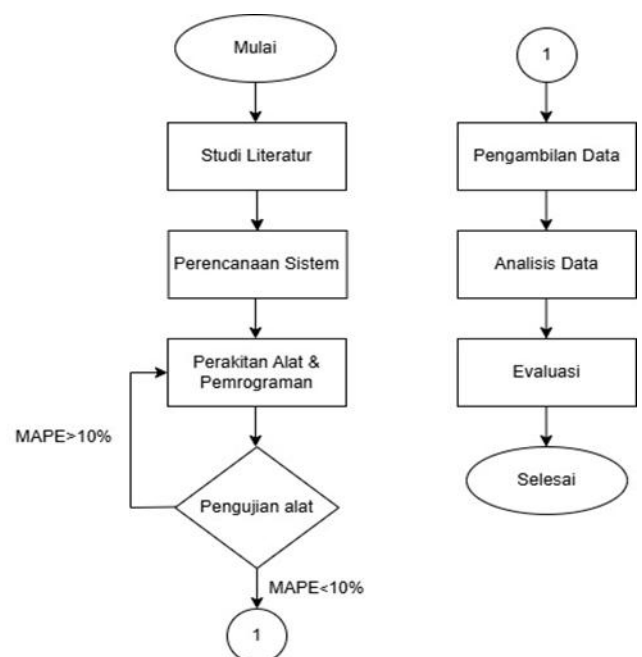
Kedua parameter tersebut berperan penting dalam menjaga keseimbangan fisiologis dan proses metabolisme ikan [4]., Ikan lele dapat tumbuh optimal pada kisaran pH 6,5–8,5 dan suhu air antara 26–32 °C [5]. Ketidaksesuaian kondisi air dengan rentang tersebut dapat menyebabkan stres yang berdampak pada penurunan kesehatan ikan. Air dengan pH terlalu rendah dapat berakibat fatal [6], sedangkan suhu yang terlalu tinggi berpotensi merusak organ dalam ikan [7]. Selain itu, suhu juga memengaruhi nafsu makan serta kemampuan ikan dalam mencerna pakan secara efisien [8]. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penerapan teknologi smart aquaculture mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem budidaya ikan melalui otomatisasi dan pemantauan berbasis teknologi [9], pengembangan prototipe penyebar pakan otomatis yang dikombinasikan dengan kendali pH berbasis Internet of Things (IoT) terbukti dapat meningkatkan ketepatan pemberian pakan dan menjaga kualitas air kolam [10]. Sistem pengaturan pH dan pemberian pakan ikan secara otomatis menggunakan mikrokontroler telah berhasil diimplementasikan untuk mendukung pengelolaan kolam yang lebih efisien dan terkontrol [11]. Penerapan IoT untuk monitoring kualitas air memungkinkan pengukuran pH dan suhu kolam dilakukan secara real-time dan jarak jauh sehingga proses pemantauan menjadi lebih efektif [12]. Sistem monitoring pH dan suhu berbasis IoT telah diterapkan pada industri budidaya ikan dan menunjukkan kinerja yang stabil dalam menyajikan data kualitas air secara daring [13]. Pengendalian suhu otomatis berbasis mikrokontroler efektif menjaga kestabilan suhu air, namun belum menerapkan metode kendali cerdas [14]. Logika fuzzy efektif digunakan untuk mengolah variasi pH dan suhu secara dinamis dalam penilaian kualitas air kolam ikan lele [15]. Penerapan logika fuzzy juga meningkatkan ketepatan klasifikasi kualitas air berdasarkan parameter pH dan suhu [16].

Sebagian besar sistem yang telah dikembangkan belum terintegrasi secara optimal dengan platform IoT berbasis cloud untuk monitoring dan pengendalian jarak jauh.

Berdasarkan tinjauan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem pengendalian pH dan suhu kolam ikan lele berbasis Internet of Things (IoT) dan logika fuzzy Mamdani menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem dirancang dengan sensor dan aktuator yang tervalidasi memiliki nilai galat pengukuran di bawah 10% berdasarkan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Kinerja sistem diuji dengan mempertahankan pH air pada set-point $7 \pm 0,5$ dan suhu air pada $26,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5$, serta diintegrasikan dengan Arduino IoT Cloud untuk mendukung monitoring dan pengendalian secara real-time.

II. METODE PENELITIAN

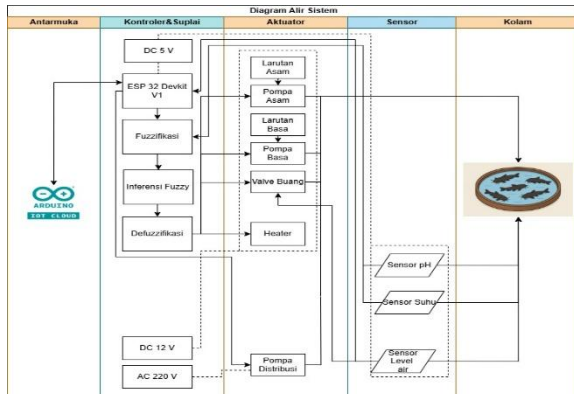
A. DIAGRAM ALUR PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alur Tahapan Penelitian

Blok diagram alir penelitian ini yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dimana penelitian ini Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori terkait kualitas air, sistem IoT, dan metode logika fuzzy. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem yang meliputi perangkat keras dan perangkat lunak. Setelah sistem dirancang, dilakukan pengujian sensor dan sistem secara menyeluruh. Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor. Sensor dinyatakan layak digunakan apabila nilai MAPE berada di bawah 10%. Apabila nilai galat melebihi batas tersebut, dilakukan evaluasi dan perancangan ulang sistem hingga diperoleh kinerja yang sesuai sistem.

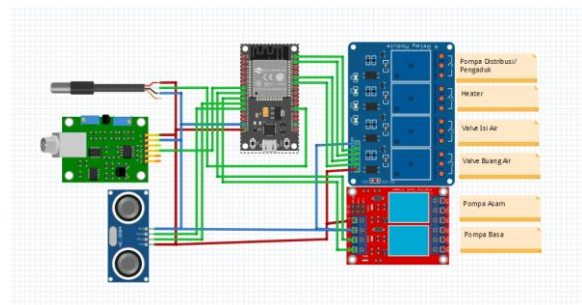
B. DIAGRAM ARSITEKTUR SISTEM



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem

Pada gambar 2 Sistem pengendalian diawali dengan proses akuisisi data kualitas air kolam ikan lele yang meliputi parameter pH, suhu, dan level air. Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman air, sensor suhu mendeteksi suhu air, sedangkan sensor level air memantau ketinggian permukaan air kolam. Seluruh data hasil pembacaan sensor dikirimkan secara kontinu ke mikrokontroler ESP32 Devkit V1 yang berfungsi sebagai pusat pengolahan dan pengendalian sistem. Data sensor yang diterima selanjutnya diproses menggunakan metode logika fuzzy Mamdani melalui tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi untuk mengubah nilai numerik menjadi nilai keanggotaan fuzzy, inferensi berdasarkan basis aturan (rule base) untuk menghasilkan keputusan fuzzy, dan defuzzifikasi untuk mengonversi hasil inferensi menjadi nilai keluaran tegas (crisp). Nilai keluaran ini digunakan oleh ESP32 untuk mengendalikan aktuator berupa pompa larutan pH up dan pH down, valve pembuangan air, serta heater guna menjaga kestabilan pH dan suhu air kolam. Selama sistem beroperasi, data sensor terus diperbarui sehingga membentuk mekanisme umpan balik tertutup (closed-loop). Selain itu, sistem terintegrasi dengan platform Arduino IoT Cloud untuk mendukung proses monitoring dan pengendalian kualitas air secara real-time dan jarak jauh melalui kontrol berbasis fuzzy logic.

C. DESAIN ELEKTRONIK



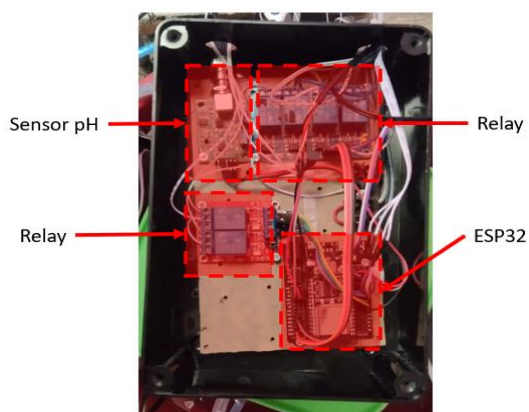
Gambar 3. Desain Elektronik

Pada Gambar 3 menunjukkan Desain elektronik berupa tata letak komponen-komponen sistem monitoring dan pengendalian pH dan suhu air kolam yang menggunakan logika fuzzy yang dimulai dari catu daya hingga aktuator yang tersusun sebagai berikut:

- 1) Sensor-sensor
 - Sensor pH meter
 - Sensor HC-SR04
 - Sensor suhu DS18B20
- 2) Mikrokontroler ESP32 DEVKIT V1
 Berfungsi sebagai otak dan pengolahan data dari sensor dan berkomunikasi dengan cloud serta pengendali aktuator.
- 3) Aktuator
 - 1 Buah Relay 2 chanell dan 1 buah relay 4 chanell

1 buah relay 2 chanell digunakan untuk pompa larutan asam dan pompa larutan basa dengan daya 12VDC, 1 buah relay 4 chanell untuk pompa distribusi, heater, valve isi air, valve buang air.

D. DESAIN MEKANIK



Gambar 4. Desain Mekanik

Pada Gambar 4. menunjukkan sistem dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Catu daya utama terdiri dari Adaptor 12 VDC dan 5 VDC untuk sensor dan modul kontrol. ESP32 menerima input dari berbagai sensor (pH, suhu, dan Level air) dan mengaktifkan aktuator relay dan pompa sesuai kebutuhan sistem.

E. PERANCANGAN LOGIKA FUZZY

pada kendali fuzzy ini mempunyai 2 variabel input: pH dan Suhu dan mempunyai 4 variabel output: Heater, Kuras Air, Larutan Asam, Dan Larutan Basa. Dalam studi kasus ini variabel pH berfungsi untuk mendeteksi tingkat keasaman atau kebasaan air pada kolam, sedangkan variabel Suhu digunakan untuk mengukur kondisi air yang berpengaruh terhadap kestabilan lingkungan ikan lele. Empat variabel output tersebut memiliki fungsi pengendalian masing-masing, yaitu Heater untuk menaikkan suhu kondisi air terlalu dingin, Kuras Air untuk menguras kolam apabila kondisi pH atau suhu berada pada batas tidak aman, Larutan Basa untuk menambah cairan basa saat air bersifat terlalu asam, dan Larutan Asam untuk menurunkan pH apabila air terlalu basa. Menilik lebih lanjut berikut detail tahapan-tahapan yang direncanakan:

- 1) Variabel Fuzzy
Variabel yang akan dibahas adalah nilai pH, Suhu, Heater, Kuras air, Larutan basa
- 2) Semesta Pembicaraan Fuzzy
Semesta Pembicaraan Fuzzy *Input*:
 - pH (0-14) pH
 - Suhu (0-100) °C
 Semesta Pembicaraan Fuzzy *Output*:
 - Heater (0-100) °C
 - Kuras Air (0-10) s
 - Larutan basa (0-10) s
 - Larutan asam(0-10)s
- 3) Himpunan Fuzzy

Tabel 1. Variabel Himpunan Fuzzy

Himpunan Variabel

Input		Output			
pH	Suhu	Heater	Kuras Air	Larutan Basa	Larutan Asam
Asam (P1)	Dingin S1	Rendah (H1)	Sedikit (K1)	Sedikit (B1)	Sedikit (A1)
Agak Asam (P2)	Agak Dingin (S2)	Sedang (H2)	Sedang (K2)	Sedang (B2)	Sedang (A2)
Normal (P_SP)	Normal (S_SP)	Tinggi (H3)	Banyak (K3)	Banyak (B3)	Banyak (A3)
Agak Basa (P4)	Agak Panas (S4)				
Basa (P5)	Panas (S5)				

4) Domain Fuzzy

Tabel 2. Domain Fuzzy

Variabel		Himpunan	Domain
Input	pH	P1	[0 0 4 5.25]
		P2	[4 5.25 6.5]
		P_SP	[5.25 6.5 7.5 8.75]
		P4	[7.5 8.75 10]
		P5	[8.75 10 14 14]
	Suhu	S1	[0 0 15 20]
		S2	[15 20 25]
		S_SP	[20 25 30 40]
		S4	[30 40 50]
		S5	[40 50 100 100]
Output	Heater	H1	[0 25 50]
		H2	[25 50 75]
		H3	[50 75 100]
	Kuras Air	K1	[0 2.5 5]
		K2	[2.5 5 7.5]
		K3	[5 7.5 10]
	L. Basah	B1	[0 2.5 5]
		B2	[2.5 5 7.5]
		B3	[5 7.5 10]
	L. Asam	A1	[0 2.5 5]
		A2	[2.5 5 7.5]
		A3	[5 7.5 10]

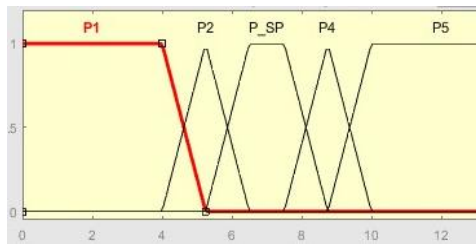
5) Keanggotaan Fuzzy

Dengan Menyusun derajat keanggotaan fuzzy, peneliti dapat secara langsung menetapkan variabel fuzzy, menentukan semesta pembicaraan, serta membentuk

himpunan fuzzy yang diperlukan sebagai berikut:

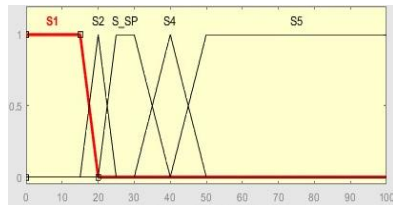
Derajat Keanggotaan Fuzzy *Input*:

1) pH



Gambar 5. Keanggotaan pH

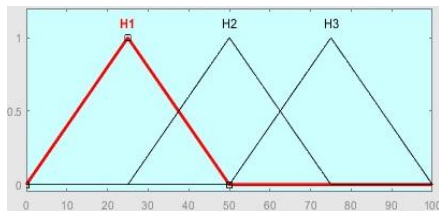
2) Suhu



Gambar 6. Keanggotaan Suhu

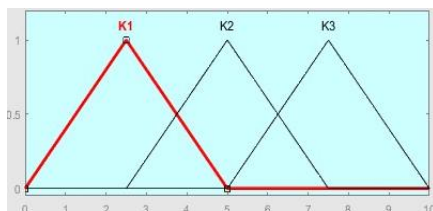
Derajat Keanggotaan Fuzzy *Output*:

1) Heater



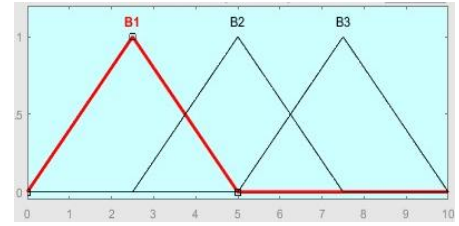
Gambar 7. Keanggotaan Heater

2) Kuras Air



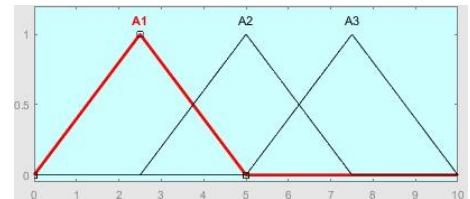
Gambar 8. Keanggotaan Kuras Air

3) Larutan Basa



Gambar 9. Keanggotaan Larutan Basa

4) Larutan Asam



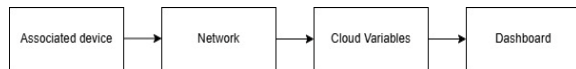
Gambar 10. Keanggotaan Larutan Asam

6) Fuzzy Rule Base

Tabel 3. Rule Base

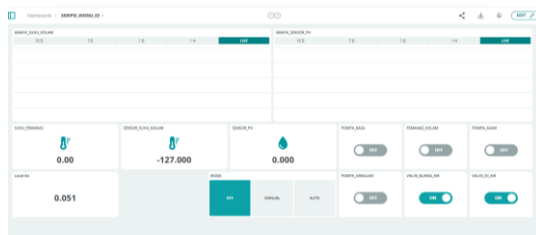
No	FUZZY RULE					
	INPUT		OUTPUT			
1	P1	P1	H3	K1	B3	A1
2	P1	S2	H2	K1	B3	A1
3	P1	S SP	H1	K1	B3	A1
4	P1	S 4	H1	K2	B2	A1
5	P1	S 5	H1	K3	B1	A1
6	P2	S1	H3	K1	B2	A1
7	P2	S2	H2	K1	B2	A1
8	P2	S SP	H1	K1	B2	A1
9	P2	S 4	H1	K2	B1	A1
10	P2	S 5	H1	K3	B1	A1
11	P SP	S1	H3	K1	B1	A1
12	P SP	S2	H2	K1	B1	A1
13	P SP	S SP	H1	K1	B1	A1
14	P SP	S 4	H1	K2	B1	A1
15	P SP	S 5	H1	K3	B1	A1
16	P 4	S1	H3	K1	B1	A2
17	P 4	S2	H2	K1	B1	A2
18	P 4	S SP	H1	K1	B1	A2
19	P 4	S 4	H1	K2	B1	A1
20	P 4	S 5	H1	K3	B1	A1
21	P 5	S1	H3	K1	B1	A3
22	P 5	S2	H2	K1	B1	A3
23	P 5	S SP	H1	K1	B1	A3
24	P 5	S 4	H1	K1	B1	A2
25	P_5	S_5	H1	K1	B1	A1

F. KONFIGURASI SISTEM INTERNET OF THINGS



Gambar 11. Infrastruktur Arduino IoT Cloud

Pada gambar 11. Konfigurasi sistem IoT dilakukan menggunakan platform Arduino IoT Cloud yang berfungsi sebagai media monitoring dan pengendalian sistem. Tahapan konfigurasi meliputi pembuatan variabel cloud serta perancangan antarmuka dashboard yang memungkinkan interaksi antara pengguna dan sistem secara daring. Dashboard digunakan untuk menampilkan data sensor dan mengatur mode kerja sistem. Mikrokontroler ESP32 Devkit V1 dikonfigurasi sebagai associated device yang berperan sebagai penghubung antara perangkat keras dan layanan cloud. Perangkat ini diberikan identitas unik dan dihubungkan ke jaringan WiFi untuk mendukung komunikasi data secara real-time. Variabel cloud diklasifikasikan menjadi read only untuk menampilkan data pH, suhu, dan level air, serta read & write untuk mengirimkan perintah kendali dari dashboard ke sistem

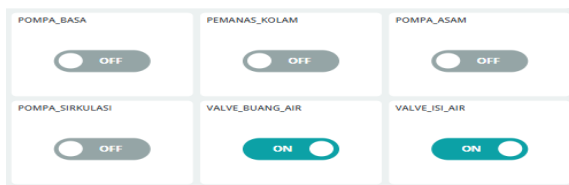


Gambar 12. Wireframe Dashboard

Pada gambar 12. menunjukkan memuat dashboard pada Arduino IoT Cloud yang dibuat berdasarkan sistem ini dapat diakses melalui aplikasi Arduino IoT remote pada perangkat mobile maupun melalui web browser. Kemampuan ini memberikan kemudahan bagi pengguna dalam melakukan pemantauan dan pengendalian sistem secara real-time dari berbagai lokasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENGUJIAN DIGITAL OUTPUT



Gambar 13. Digital Output Sistem

Pengujian keluaran digital dilakukan melalui dashboard Arduino IoT Cloud dengan memberikan perintah ON dan OFF pada setiap aktuator. Perintah yang dikirimkan dari dashboard selanjutnya diterima oleh mikrokontroler ESP32 dan diterjemahkan menjadi sinyal kendali digital. Respons kerja masing-masing aktuator kemudian diamati untuk memastikan kesesuaian antara

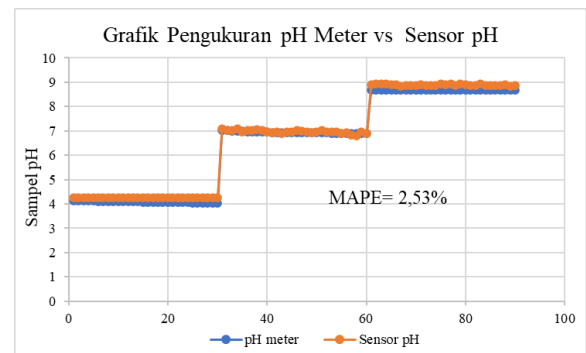
perintah yang diberikan dan kondisi aktual perangkat. Aktuator yang diuji meliputi pompa larutan pH up, pompa larutan pH down, pompa sirkulasi air, valve pembuangan air, dan valve pengisian air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh aktuator merespons perintah dari dashboard dengan baik dan bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

Tabel 4. Pengujian Aktuator

Item	Perintah Dari Cloud	Aktual	Keterangan
Heater	ON	HIGH	Sesuai
	OFF	LOW	
Kuras air	ON	HIGH	Sesuai
	OFF	LOW	
Larutan basa	ON	HIGH	Sesuai
	OFF	LOW	
Larutan asam	ON	HIGH	Sesuai
	OFF	LOW	

Pada Tabel.4 Validasi Digital Output Menunjukkan hasil pengujian pada digital output. Ketika pengguna mengirimkan perintah ON melalui dashboard Arduino IoT Cloud, mikrokontroler ESP32 memberikan sinyal HIGH ke modul relay, sehingga pompa dan katup (valve) diaktifkan. Sebaliknya, saat perintah OFF dikirimkan, ESP32 mengeluarkan sinyal LOW yang menyebabkan pompa dan katup menjadi tidak aktif.

B. PENGUJIAN SENSOR pH

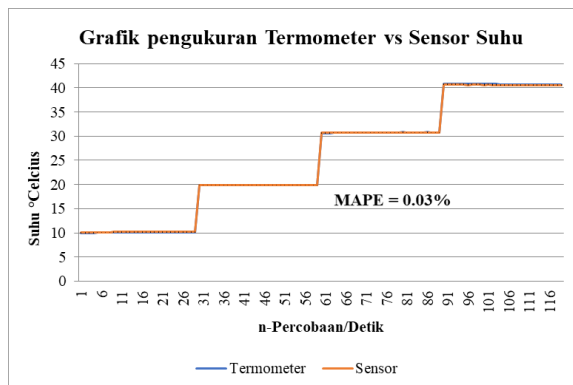


Gambar 14. Grafik Hasil Pengujian Sensor pH

Pada Gambar 14. Grafik Pengujian Sensor pH Dengan pH Meter menunjukkan hasil perbandingan pengukuran antara Ph Meter vs Sensor pH, Berdasarkan analisis diperoleh nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) rata-rata total sebesar 2,53%. Nilai MAPE ini berada masih berada di bawah batas kelayakan 10%, yang berarti bahwa kesalahan rata-rata pembacaan sensor tidak boleh melebihi 10% dari nilai sebenarnya untuk dapat dinilai layak dan akurat. Hasil ini mengonfirmasi bahwa telah berhasil menghasilkan sistem pengukuran pH yang cukup

akurat dan valid untuk digunakan sebagai input bagi sistem kendali fuzzy.

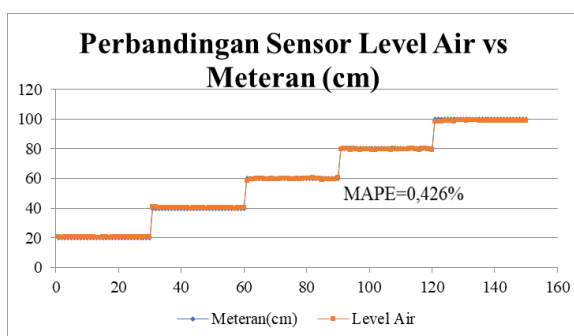
C. PENGUJIAN SENSOR SUHU



Gambar 15. Grafik Hasil Pengujian Sensor TDS

Berdasarkan Gambar 15. grafik perbandingan antara sensor suhu dan termometer diperoleh nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) rata-rata total sebesar 0,03%. Nilai MAPE ini berada jauh di bawah ambang batas kelayakan 10%, yang berarti bahwa kesalahan rata-rata pembacaan sensor tidak boleh melebihi 10% dari nilai sebenarnya untuk dapat dinilai layak dan akurat. sehingga dapat disimpulkan bahwa Sensor Suhu DS18B20 memiliki akurasi yang sangat tinggi. Analisis lebih lanjut pada grafik menunjukkan bahwa sensor memiliki kinerja paling optimal pada rentang suhu ruang (25-30°C), di mana galat pengukurannya sangat minimal. Dengan demikian, sensor ini dinyatakan valid dan andal untuk digunakan dalam system.

D. PENGUJIAN SENSOR LEVEL AIR



Gambar 16 . Grafik Hasil Pengujian Sensor Level Air

Pada Gambar 16. Grafik Pengukuran Meteran vs Sensor Level Air, diperoleh nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) rata-rata total sebesar 0,42%. Nilai MAPE ini berada jauh di bawah ambang batas kelayakan 10%, yang berarti bahwa kesalahan rata-rata pembacaan sensor tidak boleh melebihi 10% dari nilai sebenarnya untuk dapat

dinilai layak dan akurat. sehingga dapat disimpulkan bahwa Sensor Ultrasonik HC-SR04 memiliki akurasi yang baik dalam pengukuran jarak. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa selisih pengukuran sensor terhadap meteran relatif stabil dan konsisten di seluruh rentang pengujian. Dengan demikian, sensor HC-SR04 dinyatakan valid dan andal untuk pengukuran jarak yang diperlukan dalam sistem ini.

E. PENGUJIAN PERHITUNGAN FUZZY

Tabel 5. Hasil Pengujian Perhitungan Fuzzy dengan MATLAB

No	Aktuator	Output Matlab	ESP32	Error
1	Heater	25	25	0 %.
2	Pompa basa	2,5	2,5	0 %.
3	Pompa asam	2,5	2,5	0 %.
4	Kuras air	7,5	7,5	0 %.

Pengujian perhitungan fuzzy dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan dari mikrokontroler ESP32 Devkit V1 dengan hasil perhitungan aplikasi MATLAB. Hal ini bertujuan untuk mengetahui bahwa implementasi logika fuzzy pada mikrokontroler ESP32 Devkit V1 telah memenuhi akurasi yang baik dan sudah sesuai.

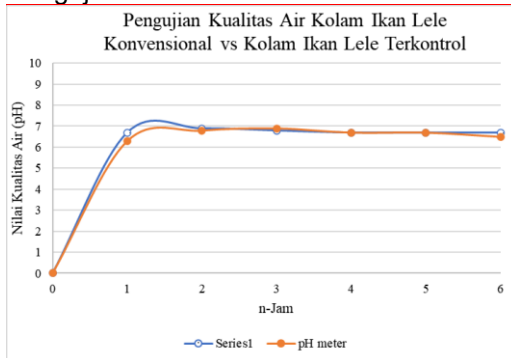
Berdasarkan pada Tabel 5. nilai perhitungan MAPE dari mikrokontroler ESP32 Devkit V1 dengan aplikasi Matlab Implementasi logika fuzzy pada mikrokontroler ESP32 menghasilkan keluaran yang sepenuhnya identik dengan simulasi di MATLAB (MAPE = 0 %). Hal ini membuktikan bahwa algoritma fuzzy telah diimplementasikan dengan tepat dan valid, sehingga dapat diandalkan untuk pengendalian aktuator dalam sistem otomatis kualitas air kolam.

F. PENGUJIAN SISTEM KESELURUHAN

Pengujian sistem keseluruhan dilakukan untuk menilai kinerja sistem pengendali kualitas air berbasis logika fuzzy dalam menjaga parameter pH dan suhu kolam ikan lele agar tetap berada pada kondisi ideal. Pada kedua kondisi pengujian, yaitu kolam konvensional dan kolam terkontrol, data pH dan suhu direkam setiap 1 jam guna memastikan proses perbandingan berlangsung konsisten dan terukur. Sebelum pengujian, ditetapkan target set-point sebagai acuan pengendalian, yaitu pH sebesar $7 \pm 0,5$ dan suhu sebesar $26,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai set-point ini digunakan untuk menentukan batas toleransi penyimpangan yang memerlukan intervensi sistem. Pada kolam konvensional, perubahan kualitas air dibiarkan berlangsung alami tanpa kendali otomatis, sedangkan pada kolam terkontrol seluruh perangkat sistem sensor pH, sensor suhu, aktuator, dan modul komunikasi Arduino IoT Cloud

diaktifkan untuk memungkinkan respons korektif secara real-time oleh logika fuzzy.

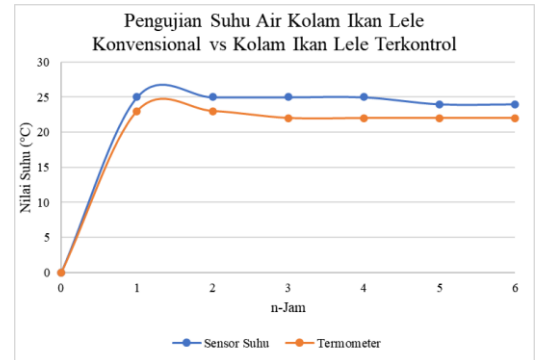
a. Pengujian kualitas air kolam



Gambar 17. Grafik Pengujian kualitas air kolam

Pada pengujian sistem keseluruhan yang ditunjukkan pada gambar grafik pertama hasil pengujian kualitas air yang membandingkan nilai pH pada kolam konvensional dan kolam terkontrol. Pada kolam konvensional, nilai pH mengalami fluktuasi yang cukup signifikan dengan rentang 6,3–6,9. Karena tidak dilengkapi mekanisme kendali otomatis, nilai pH tidak mengalami koreksi meskipun telah mendekati batas bawah yang kurang ideal bagi pertumbuhan ikan lele. Kondisi ini menunjukkan keterbatasan metode konvensional dalam menjaga kestabilan pH air. Sebaliknya, pada kolam terkontrol berbasis logika fuzzy, nilai pH menunjukkan kestabilan yang lebih baik dan berada pada rentang 6,7–6,9 sesuai dengan set-point $7 \pm 0,5$. Sistem fuzzy mampu merespons penyimpangan pH secara adaptif melalui pembacaan sensor secara real-time dengan mengaktifkan aktuator pH-up atau pH-down secara proporsional. Hasil pengujian menunjukkan deviasi rata-rata sebesar 0,13%, serta grafik pH yang lebih stabil tanpa fluktuasi tajam maupun overshoot. Hal ini membuktikan bahwa penerapan logika fuzzy efektif dalam mempertahankan pH air pada kondisi optimal.

b. Pengujian nilai pH dari kondisi basa ke rentang normal



Gambar 18. Grafik Pengujian suhu air kolam

Berdasarkan pada gambar grafik pengujian Grafik pengujian suhu digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem berbasis logika fuzzy dalam mempertahankan suhu air pada set-point $26,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada kolam konvensional, hasil pengujian menunjukkan suhu air berada pada rentang $22\text{--}23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, yang berada di bawah batas ideal. Penurunan suhu, terutama pada malam hari, tidak dapat dikompensasi karena tidak adanya mekanisme pemanas yang dikendalikan secara otomatis, sehingga suhu kolam sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan eksternal. Sebaliknya, pada kolam terkontrol, suhu air berada pada kisaran $24\text{--}25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan masih termasuk dalam rentang set-point yang ditetapkan. Pola grafik menunjukkan kestabilan yang lebih baik tanpa perubahan suhu yang drastis. Sistem logika fuzzy mampu mengaktifkan heater ketika suhu mendekati batas bawah, sehingga fluktuasi suhu dapat diminimalkan. Deviasi pembacaan sensor terhadap termometer referensi berada pada rentang $1\text{--}3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan rata-rata $2,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$, yang masih dapat diterima untuk sistem pengendalian berbasis fuzzy. Hasil ini menunjukkan bahwa logika fuzzy efektif dalam menjaga kestabilan suhu air meskipun kondisi lingkungan tidak mendukung.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis sistem, dapat disimpulkan bahwa platform Arduino IoT Cloud terbukti andal dalam mendukung fungsi monitoring dan kendali kualitas air secara jarak jauh. Parameter pH, suhu, dan level air dapat dipantau secara real-time, serta perintah kendali dapat dieksekusi dengan waktu respons sistem berkisar antara 1–2 detik,

sehingga memenuhi kebutuhan pengendalian kolam ikan lele berbasis IoT.

Sistem kendali pH dan suhu kolam ikan lele berhasil dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor pH, sensor suhu, sensor level air, serta aktuatur pendukung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki nilai galat pengukuran di bawah 10% berdasarkan perhitungan Mean Absolute Percentage Error (MAPE), sehingga sistem dinyatakan valid dan layak digunakan untuk pengendalian kualitas air.

Penerapan logika fuzzy sebagai metode kendali terbukti mampu menjaga kestabilan parameter pH dan suhu dalam rentang set-point yang ditetapkan. Nilai pH dapat dipertahankan pada $7 \pm 0,5$ tanpa fluktuasi tajam, sedangkan suhu air berada pada kisaran $24\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang masih sesuai dengan batas kendali $26,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem kendali berbasis logika fuzzy bersifat adaptif dan konsisten dalam menjaga kualitas air kolam ikan lele pada kondisi optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Wafa, "Penduduk Indonesia Tumbuh 200% Sejak 1960, Capai 281,6 Juta Jiwa pada 2024," *GoodStats*, 2024. [Online]. Available: <https://data.goodstats.id/statistic/penduduk-indonesia-tumbuh-200-sejak-1960-capai-2816-juta-jiwa-pada-2024-bM8DV>
- [2] Badan Pusat Statistik, "Produksi Perikanan Budidaya Menurut Komoditas Utama (Ton)," *Badan Pusat Statistik*, 2024. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTUxMyMy/produksi-perikanan-budidaya-menurut-komoditas-utama.html>,
- [3] S. Langi, S. Maulu, O. J. Hasimuna, V. K. Kapula, and M. Tjipute, "Nutritional requirements and effect of culture conditions on the performance of the African catfish (*Clarias gariepinus*): A review," *Cogent Food & Agriculture*, vol. 10, no. 1, p. 2302642, 2024.
- [4] N. R. Caesar, U. Yanuhar, D. Raharjo, and N. S. Junirahma, "Monitoring of water quality in the catfish (*Clarias sp.*) farming in Tuban Regency," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1206, 2021.
- [5] J. Rey et al., "Impact of higher temperatures on yolk sac absorption and early development in hybrid catfish between *Clarias gariepinus* and *C. macrocephalus*," *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 56, no. 1, p. e13119, 2025.
- [6] J. Darmawan, T. D. K. Pribadi, and J. Haryadi, "The effect of gradual decrease in pH level on the survival rate and glucose levels of catfish (*Pangasius sp.*)," *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, vol. 14, no. 3, pp. 1231–1241, 2021.
- [7] M. A. O. Dawood, A. E. Noreldin, and H. Sewilam, "Blood biochemical variables, antioxidative status, and histological features of African catfish (*Clarias gariepinus*) exposed to high salinity and high-temperature stress," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 37, pp. 56357–56369, 2022.
- [8] H. Volkoff and I. Rønnestad, "Effects of temperature on feeding and digestive processes in fish," *Temperature*, vol. 7, no. 4, pp. 307–320, 2020.
- [9] M. A. M. Efendi, F. Badri, and A. Habibi, "Budidaya ikan lele berbasis IoT dengan metode fuzzy logic," *Electro Science*, vol. 19, no. 1, pp. 161–169, 2025.
- [10] D. Rusdianto, F. Badri, and E. S. Wirateruna, "Rancang bangun prototype penebar pakan otomatis dengan kendali pH berbasis IoT," *Science Electro*, vol. 14, no. 3, 2022.
- [11] M. Dahlan, M. J. Afroni, and M. T. Alawiy, "Prototype pemberi pakan harian pada tambak ikan air tawar berbasis Arduino," *Science Electro*, vol. 11, no. 2, 2019.
- [12] F. Hidayat, A. Harijanto, and B. Supriadi, "Rancang bangun alat ukur monitoring pH dan suhu kolam ikan lele berbasis IoT dengan ESP8266," *Jurnal Kumparan Fisika*, vol. 5, no. 2, pp. 77–84, 2022.
- [13] D. Erwanto and I. Yanuartanti, "Perancangan alat monitoring sensor pH dan suhu pada kolam lele berbasis IoT," in *Proceedings of the National Conference on Electrical, Informatics and Industrial Technology (NEIIT)*, 2024, pp. 333–341.
- [14] M. Hariyadi, E. K. Pramartaningthyas, S. Ma'shumah, and M. F. A. Salam, "Sistem kontrol suhu dan monitoring pH air pada aquarium benih ikan lele dumbo berbasis IoT," *Qomaruna Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 2, no. 1, pp. 57–68, 2024.
- [15] H. Pujiharsono and D. Kurnianto, "Sistem inferensi fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat kualitas air pada kolam bioflok ikan lele," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 8, no. 2, pp. 84–88, 2020.

- [16] M. Y. A. Syawari *et al.*, "Sistem inferensi fuzzy Tsukamoto untuk menentukan tingkat kualitas air kolam budidaya ikan lele," *Sienna*, vol. 5, no. 1, pp. 95–109, 2024