

Monitoring Kualitas Air Bersih Rumah Tangga Berbasis IoT Secara Real Time Dengan Metode Logika Fuzzy Mamdani

Irmayanti ^{1, a} Muh.Fahmi Rustan ^{1, b} Chairi Nur Insani ^{1, c}

¹ Program Studi Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

Jalan Prof. Dr. Baharuddin Lopa, S.H, Talumung 91412, Indonesia

e-mail: ^a irma33037@gmail.com, ^b muhfahmi@unsulbarl.ac.id, dan ^c chairini@unsulbar.ac.id

Diajukan: 18 April 2026; Diterima: 7 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Kualitas air memiliki peran penting dalam kehidupan sehari-hari, namun proses pemantauan pada tingkat rumah tangga masih terbatas dan umumnya hanya menampilkan data mentah sensor yang sulit dipahami oleh pengguna. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) yang dipadukan dengan metode Logika Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan informasi kualitas air yang lebih informatif dan mudah diinterpretasikan secara real-time. Sistem dirancang menggunakan sensor pH, Total Dissolved Solids (TDS), dan turbidity yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32, komunikasi MQTT, serta antarmuka berbasis web. Dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya memanfaatkan satu parameter atau menampilkan data sensor secara langsung, sistem ini menggunakan pendekatan multi-parameter dan metode fuzzy untuk menghasilkan klasifikasi kualitas air secara otomatis. Metode fuzzy digunakan untuk mengolah data sensor menjadi kategori kualitas air, yaitu bersih, sedang tercemar, dan berbahaya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki tingkat kesalahan rata-rata sebesar 3,21% dan sensor TDS sebesar 6,07%, yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Sistem juga mampu mengikuti pola perubahan data aktual dengan baik dan menghasilkan klasifikasi kualitas air pada kategori sedang tercemar akibat pengaruh faktor lingkungan. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas air serta mendukung pengambilan keputusan melalui penyajian informasi yang lebih jelas, otomatis, dan mudah dipahami.

Kata kunci: ESP32, Internet of Things (IoT), Logika Fuzzy Mamdani, Monitoring Kualitas Air, Sensor pH, Total Dissolved Solids (TDS), Turbidity Sensor

Abstract

Water quality plays an important role in daily life; however, monitoring processes at the household level are still limited and generally only display raw sensor data that are difficult for users to understand. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based water quality monitoring system integrated with the Mamdani Fuzzy Logic method to provide more informative and easily interpretable real-time water quality information. The system was designed using pH, Total Dissolved Solids (TDS), and turbidity sensors integrated with an ESP32 microcontroller, MQTT communication, and a web-based interface. Compared to previous studies that generally used only a single parameter or directly displayed sensor data, this system applies a multi-parameter approach and fuzzy logic to automatically classify water quality. The fuzzy method processes sensor data into water quality categories, namely clean, moderately polluted, and hazardous. The test results showed that the pH sensor had an average error rate of 3.21% and the TDS sensor had an average error rate of 6.07%, which are still within acceptable tolerance limits. The system was also able to follow the pattern of actual data changes properly and classified the water quality as moderately polluted due to environmental factors. Overall, the developed system improves the effectiveness of water quality monitoring and supports decision-making through clearer, automatic, and easier-to-understand information presentation.

Keywords: ESP32, Internet of Things (IoT), Mamdani Fuzzy Logic, Water Quality Monitoring, pH Sensor, Total Dissolved Solids (TDS), Turbidity Sensor

PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia, namun kualitasnya di tingkat rumah tangga sering mengalami penurunan akibat kontaminasi lingkungan dan variasi parameter fisikokimia. Parameter seperti pH, Total Dissolved

Solids (TDS), dan kekeruhan menjadi indikator penting dalam menentukan kelayakan air. Pemantauan kualitas air secara konvensional umumnya masih terbatas dan belum mampu memberikan informasi secara real-time [1][2].

Parameter pH, Total Dissolved Solids (TDS), dan turbidity dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi kualitas air dari aspek kimia maupun fisik. Nilai pH digunakan untuk mengidentifikasi tingkat keasaman atau kebasaan air yang dapat memengaruhi kandungan kimia dan kelayakan konsumsi. TDS menunjukkan jumlah zat padat terlarut seperti mineral, garam, dan ion yang dapat memengaruhi rasa serta kualitas air, sedangkan turbidity digunakan untuk mengukur tingkat kekeruhan akibat partikel tersuspensi yang dapat mengindikasikan adanya kontaminasi pada air. Ketiga parameter tersebut banyak digunakan dalam sistem monitoring kualitas air karena mampu memberikan gambaran kondisi air secara komprehensif [3][4].

Meskipun teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan kemampuan monitoring secara otomatis dan real-time, implementasinya pada sistem kualitas air masih menghadapi beberapa kendala seperti fluktuasi pembacaan sensor akibat noise dan pengaruh kondisi lingkungan [3][4]. Namun berdasarkan hasil pengujian pada penelitian ini, komunikasi data menggunakan protokol MQTT menunjukkan performa yang cukup stabil dengan waktu pengiriman data sekitar 5 detik tanpa kehilangan data yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kendala komunikasi pada sistem yang dikembangkan tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap proses monitoring secara keseluruhan.

Penilaian kualitas air seringkali bergantung pada karakteristik penting seperti pH, Total Dissolved Solids (TDS), dan kekeruhan. Kekeruhan, misalnya, merupakan indikator penting keberadaan partikel tersuspensi, yang mengukur kejernihan air dan dapat mengindikasikan kontaminasi. Peraturan nasional menetapkan kekeruhan maksimum yang diizinkan sebesar 5 NTU untuk air minum [3]. Namun, sebagian besar sistem berbasis IoT saat ini memperlakukan faktor-faktor ini secara individual dan terutama berfokus pada tampilan data sensor mentah melalui dashboard. Pendekatan ini kurang memiliki kemampuan analitis dan seringkali gagal memberikan interpretasi yang bermakna kepada pengguna non-ahli. Akibatnya, pengguna dapat salah menafsirkan data, yang mengakibatkan keputusan yang buruk atau keterlambatan respons terhadap masalah kesehatan yang signifikan.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sensor IoT berbiaya rendah secara intrinsik rentan terhadap ketidakpastian, kebisingan, dan pergeseran kalibrasi, yang dapat secara drastis mengurangi akurasi pengukuran [6][7]. Berbagai penelitian telah mencoba mengatasi masalah tersebut melalui pendekatan cerdas seperti *Machine Learning* (ML), yang mampu menghasilkan akurasi prediksi tinggi. Namun, metode tersebut membutuhkan dataset pelatihan yang besar dan sumber daya komputasi yang tinggi sehingga kurang sesuai diterapkan pada perangkat *edge* seperti mikrokontroler [8][9]. Sementara itu, sistem berbasis aturan konvensional juga memiliki keterbatasan dalam menangani ketidakpastian data. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang mampu menangani ketidakpastian data dengan kebutuhan komputasi yang lebih ringan.

Untuk mengatasi kendala-kendala ini, logika fuzzy, khususnya pendekatan Logika Fuzzy Mamdani, menawarkan alternatif yang efektif karena kemampuannya untuk menangani ketidakpastian dan mengekspresikan pemikiran manusia menggunakan variabel linguistik. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem berbasis fuzzy dapat meningkatkan akurasi pengambilan keputusan dalam evaluasi kualitas air [11], [12]. Namun, sebagian besar studi ini hanya berfokus pada pengembangan algoritma atau infrastruktur IoT, daripada mengintegrasikan kedua komponen tersebut secara menyeluruh ke dalam sistem real-time yang kohesif. Selain itu, masih sedikit penelitian tentang masalah penggabungan inferensi fuzzy dengan protokol komunikasi latensi rendah seperti MQTT dalam sistem skala domestik.

Akibatnya, terdapat kesenjangan penelitian yang jelas: sistem pemantauan air berbasis IoT saat ini kurang memiliki kemampuan pengambilan keputusan yang cerdas atau gagal menggabungkan kemampuan tersebut ke dalam arsitektur yang kuat, real-time, dan ramah pengguna yang sesuai untuk situasi rumah tangga. Terdapat kebutuhan mendesak akan sistem yang tidak hanya mengumpulkan data secara konsisten, tetapi juga mengubahnya menjadi informasi yang berguna di bawah batasan dunia nyata seperti ketidakstabilan jaringan dan ketidakpastian sensor.

Sebagai tanggapan terhadap kesenjangan ini, makalah ini menyajikan sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT terintegrasi yang menggunakan Logika Fuzzy Mamdani untuk membuat keputusan secara real-time. Sistem ini dimaksudkan untuk mengatasi masalah teknis dan praktis dengan menggabungkan pemrosesan data multi-sensor, komunikasi latensi rendah melalui MQTT, dan antarmuka web yang mudah digunakan.

Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani dengan memanfaatkan sensor pH, TDS, dan turbidity yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Perbedaan penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada integrasi pengambilan keputusan menggunakan logika fuzzy secara langsung pada sistem monitoring real-time. Sistem yang dikembangkan tidak hanya menampilkan data sensor dalam bentuk numerik, tetapi juga mengubah data tersebut menjadi kategori kualitas air berupa bersih, sedang tercemar, dan berbahaya. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuan pengolahan data multi-parameter secara real-time melalui protokol MQTT serta penyajian informasi

yang lebih mudah dipahami pengguna melalui antarmuka berbasis web. Kontribusi penelitian ini adalah menghasilkan sistem monitoring kualitas air rumah tangga yang mampu meningkatkan efektivitas pemantauan dan mendukung pengambilan keputusan secara lebih cepat dan akurat.

METODE

Studi Sistem dan Lokasi Pengujian

Penelitian ini dilakukan di Desa Tammerodo Utara, Kecamatan Tammerodo Sendana, Kabupaten Majene, Provinsi Sulawesi Barat, Indonesia. Lokasi penelitian dipilih karena sebagian masyarakat masih memanfaatkan sumber air rumah tangga yang kualitasnya dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar, seperti aktivitas domestik, perubahan cuaca, serta keberadaan partikel sedimen dan kandungan mineral dalam air. Sumber air yang digunakan dalam penelitian berasal dari air rumah tangga yang digunakan masyarakat sehari-hari sebagai objek pengujian sistem monitoring kualitas air. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui perubahan kualitas air berdasarkan parameter fisik dan kimia yang diukur secara real-time.

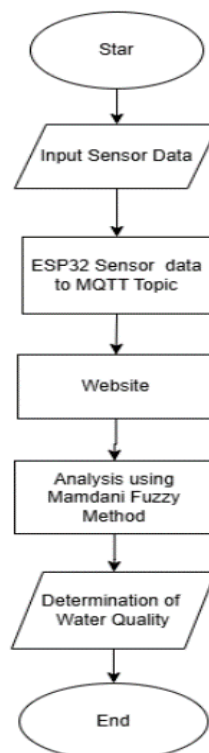
Sistem yang digunakan dalam penelitian ini bertujuan melakukan pemantauan kualitas air secara real-time di lingkungan rumah tangga dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) yang dikombinasikan dengan Logika Fuzzy Mamdani sebagai mekanisme pengambilan keputusan.

Pemanfaatan IoT dalam sistem monitoring memungkinkan akuisisi dan transmisi data secara kontinu dan efisien, setelah banyak digunakan dalam sistem pemantauan lingkungan berbasis sensor secara *real-time* [6]. Arsitektur sistem terdiri dari tiga komponen utama: (1) sensor node sebagai unit pengumpulan data, (2) sistem komunikasi berbasis MQTT, terdiri dari (3) platform berbasis web untuk visualisasi dan manajemen data.

Parameter pH, Total Dissolved Solids dan kekeruhan dipilih sebagai indikator utama dalam penelitian ini karena memiliki kemampuan dalam merepresentasikan kondisi dasar kualitas air, baik dari aspek fisik maupun kimia. Selain itu, ketiga parameter tersebut dinilai sesuai untuk diimplementasikan dalam sistem pemantauan berbasis Internet of Things secara real-time. Parameter-parameter ini juga secara luas digunakan dalam sistem monitoring kualitas air berbasis sensor, mengingat kemudahan dalam proses akuisisi data serta efisiensi dalam pengukuran [4].

Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1 dan disusun berdasarkan tiga lapisan utama dalam sistem IoT, yaitu *perception layer*, *network layer*, dan *application layer* [13].



Gambar 1. Arsitektur Sistem Pemantauan Kualitas Air Berbasis IoT

Gambar 1 menunjukkan alur kerja sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat kualitas air secara real-time. Proses sistem dimulai dari tahap pengambilan data sensor hingga menghasilkan klasifikasi kualitas air.

1. Start

Tahap awal sistem dimulai dengan mengaktifkan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan. Pada tahap ini mikrokontroler ESP32 melakukan inisialisasi sensor, koneksi jaringan Wi-Fi, serta persiapan komunikasi menggunakan protokol MQTT.

2. Input Sensor Data

Pada tahap ini sensor pH, sensor TDS (*Total Dissolved Solids*), dan sensor turbidity melakukan pembacaan kondisi air secara langsung. Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air, sensor TDS mengukur jumlah zat padat terlarut, sedangkan sensor turbidity mengukur tingkat kekeruhan air.

3. ESP32 Sensor Data to MQTT Topic

Data hasil pembacaan sensor selanjutnya diproses oleh mikrokontroler ESP32. Setelah data diperoleh, ESP32 mengirimkan nilai sensor ke *broker* MQTT melalui *topic* yang telah ditentukan. MQTT digunakan karena memiliki mekanisme komunikasi ringan (*lightweight protocol*) sehingga sesuai untuk sistem IoT yang membutuhkan pengiriman data secara cepat dan efisien.

4. Website

Data sensor yang dikirim melalui MQTT diterima oleh server dan ditampilkan pada antarmuka website. Website berfungsi sebagai media visualisasi yang memungkinkan pengguna memantau nilai pH, TDS, dan kekeruhan air secara real-time.

5. Analysis Using Mamdani Fuzzy Method

Setelah data diterima oleh sistem, dilakukan proses analisis menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani. Tahapan fuzzy terdiri dari:

- 1) Fuzzifikasi, yaitu mengubah data numerik sensor menjadi variabel linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi.
- 2) Inferensi, yaitu menerapkan aturan (*rule*) fuzzy untuk menentukan hubungan antar parameter.
- 3) Defuzzifikasi, yaitu mengubah hasil fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp value*) yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan.

6. Determination of Water Quality

Berdasarkan hasil proses fuzzy, sistem menghasilkan keputusan akhir berupa kategori kualitas air yaitu:

- 1) Bersih
- 2) Sedang Tercemar
- 3) Berbahaya

Hasil klasifikasi ini membantu pengguna memahami kondisi air tanpa harus menafsirkan nilai sensor secara manual.

7. End

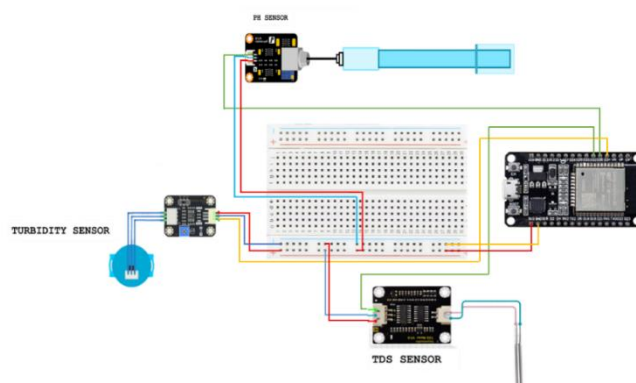
Tahap akhir menunjukkan bahwa proses klasifikasi selesai dilakukan. Namun dalam implementasi sebenarnya, sistem berjalan secara terus-menerus (*looping*) sehingga proses pembacaan dan monitoring kualitas air dapat dilakukan secara real-time.

Konfigurasi dan Integrasi Perangkat Keras

Sistem perangkat keras dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki frekuensi kerja sebesar 240 MHz dan resolusi ADC 12-bit. Sensor pH, TDS, dan kekeruhan dihubungkan ke pin analog masing-masing, yaitu GPIO34, GPIO35, dan GPIO32. Penggunaan mikrokontroler ESP32 dalam sistem IoT banyak dipilih karena memiliki performa tinggi, konsumsi daya rendah, serta dukungan konektivitas Wi-Fi yang stabil untuk aplikasi monitoring real-time [14]. Spesifikasi sensor yang digunakan pada penelitian ini disajikan sebagai berikut:

1. Sensor pH memiliki rentang pengukuran 0–14 pH dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 0,1$ pH pada suhu normal. Sensor ini digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air.
2. Sensor TDS memiliki rentang pengukuran 0–1000 ppm dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 10\%$, yang digunakan untuk mengukur jumlah zat padat terlarut di dalam air.
3. Sensor turbidity memiliki rentang pengukuran 0–3000 NTU dengan tingkat sensitivitas yang dipengaruhi oleh konsentrasi partikel tersuspensi dalam air.

Sumber daya listrik yang digunakan sebesar 5V DC yang kemudian diregulasi menjadi 3.3V untuk menyesuaikan kebutuhan operasional ESP32. Desain perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Perangkat Keras Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis ESP32

Dalam proses implementasi ditemukan beberapa kendala teknis berupa gangguan *noise* dan fluktuasi sinyal terutama pada sensor kekeruhan (*turbidity*) yang sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan. *Noise* pada sensor dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gangguan elektromagnetik, perubahan intensitas cahaya di sekitar sensor, kualitas catu daya, serta kondisi permukaan air saat proses pengukuran berlangsung. Gangguan tersebut dapat menyebabkan pembacaan sensor menjadi kurang stabil dan menghasilkan fluktuasi nilai yang sesaat berbeda dari kondisi aktual. Pada penelitian ini tidak diterapkan metode penyaringan sinyal (*filtering*) tambahan, sehingga data yang diperoleh merupakan hasil pembacaan langsung dari sensor dan menjadi salah satu faktor yang dipertimbangkan dalam analisis hasil pengukuran.

Validasi Sistem

Tahap validasi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan data yang akurat serta keputusan klasifikasi yang sesuai dengan kondisi aktual. Proses validasi pada penelitian ini terdiri dari dua tahap utama, yaitu validasi sensor melalui proses kalibrasi dan validasi sistem inferensi fuzzy.

Tahap awal dilakukan melalui proses kalibrasi sensor guna memastikan tingkat akurasi data yang dihasilkan. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap nilai referensi yang diperoleh dari alat ukur standar atau larutan acuan yang telah diketahui nilainya [15]. Pada sensor pH, proses kalibrasi dilakukan menggunakan larutan buffer standar pH 4,01; pH 6,86; dan pH 9,18. Sensor TDS dikalibrasi menggunakan larutan kalibrasi TDS dengan nilai referensi tertentu, sedangkan sensor kekeruhan divalidasi menggunakan sampel air dengan tingkat kekeruhan yang berbeda. Tingkat kesalahan (*error*) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Relative Error (\%)} = \frac{\text{Sensor Reading} - \text{Referensi Reading}}{\text{Referensi Reading}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

Sensor Reading = nilai hasil pembacaan sensor

Reference Reading = nilai pembandingan dari alat ukur standar atau nilai referensi

Nilai *error* yang semakin kecil menunjukkan tingkat akurasi sensor yang semakin baik sehingga sensor layak digunakan pada proses akuisisi data.

Tahap berikutnya adalah validasi sistem fuzzy yang bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menghasilkan klasifikasi kualitas air yang sesuai dengan kondisi aktual. Validasi dilakukan dengan memasukkan nilai pH, TDS, dan turbidity hasil pengukuran ke dalam sistem inferensi fuzzy Mamdani. Proses evaluasi fuzzy dilakukan melalui tiga tahapan yaitu:

1. Fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai numerik hasil sensor menjadi variabel linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan.
2. Inferensi aturan (*rule evaluation*), yaitu proses penerapan aturan logika fuzzy menggunakan operator AND dengan metode MIN untuk menentukan tingkat aktivasi setiap aturan.
3. Defuzzifikasi, yaitu proses mengubah hasil inferensi fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp value*) menggunakan metode centroid sehingga menghasilkan kategori kualitas air.

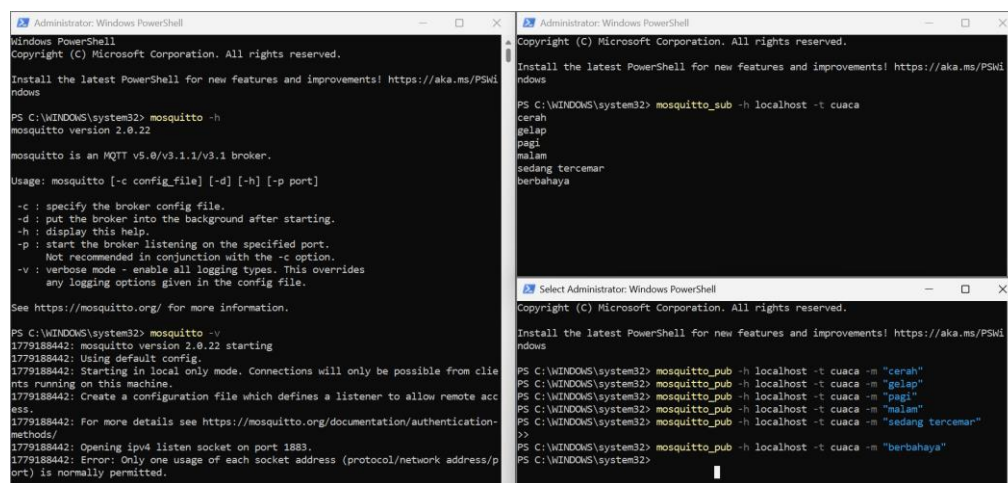
Hasil keluaran sistem fuzzy kemudian dibandingkan dengan kategori kualitas air berdasarkan ambang batas standar yang digunakan pada penelitian. Tingkat kesesuaian hasil klasifikasi digunakan untuk menilai kemampuan sistem dalam menentukan kondisi kualitas air secara tepat.

Secara keseluruhan, validasi dilakukan melalui pengujian akurasi sensor dan evaluasi hasil klasifikasi fuzzy untuk memastikan bahwa sistem monitoring mampu menghasilkan data yang akurat dan keputusan yang konsisten.

Mekanisme Komunikasi MQTT

Sistem komunikasi yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi protokol MQTT dengan model *publish-subscribe*. Dalam mekanisme ini, ESP32 berfungsi sebagai *publisher* yang mengirimkan data sensor ke broker MQTT, sedangkan server web berperan sebagai *subscriber* yang menerima data tersebut.

Protokol MQTT dipilih karena memiliki overhead yang rendah dan efisiensi yang tinggi dalam komunikasi data pada sistem IoT, khususnya pada lingkungan dengan keterbatasan bandwidth dan perangkat dengan sumber daya terbatas [16]. Selain itu, hasil pengujian pada sistem menunjukkan bahwa data dapat diterima dengan baik dalam waktu sekitar 5 detik sejak dikirim. Selama pengujian, komunikasi berlangsung stabil tanpa kendala signifikan, dengan tingkat keberhasilan penerimaan data yang tinggi dan tanpa gangguan. Seperti pada gambar 4 berikut:



Gambar 4. Proses Pengujian Komunikasi MQTT

Gambar 4 Menunjukkan pengujian menggunakan broker Mosquitto pada server lokal. Dalam pengujian tersebut, pesan berupa teks “cerah” dikirimkan ke topik “cuaca” dan berhasil diterima oleh *subscriber* secara *real-time*, yang menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi berjalan dengan baik. Hasil pengujian ini mengindikasikan bahwa protokol MQTT mampu mendukung proses transmisi data secara efisien dan tanpa kehilangan data dalam sistem yang dikembangkan.

Pengujian komunikasi MQTT dilakukan untuk mengetahui kestabilan sistem dalam proses pengiriman data dari ESP32 menuju server. Pengujian ini dilakukan dengan mengamati keberhasilan penerimaan data dan waktu yang diperlukan selama proses transmisi. Hasil pengujian komunikasi MQTT ditunjukkan pada Tabel 1.

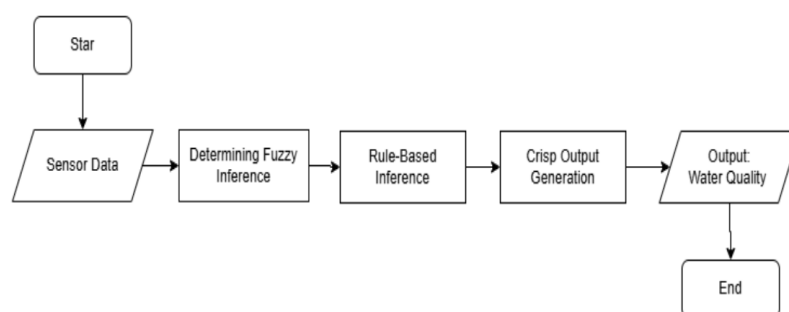
Tabel 1. Hasil Pengujian Komunikasi MQTT

No	Data yang Dikirim	Topik MQTT	Status Penerimaan	Waktu Pengiriman (detik)
1	cerah	cuaca	Berhasil	4.8
2	gelap	cuaca	Berhasil	5.1
3	pagi	cuaca	Berhasil	5.0
4	malam	cuaca	Berhasil	4.9
5	sedang tercemar	cuaca	Berhasil	5.2

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian komunikasi MQTT menggunakan broker Mosquitto pada server lokal. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan mengirimkan data dari *publisher* menuju *subscriber* menggunakan topik *cuaca*. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh data yang dikirim berhasil diterima dengan tingkat keberhasilan sebesar 100% tanpa terjadi kehilangan data (*packet loss*). Waktu pengiriman data berada pada rentang 4,7–5,2 detik dengan rata-rata sekitar 4,97 detik. Variasi waktu pengiriman dipengaruhi oleh kondisi jaringan Wi-Fi dan proses pemrosesan data pada mikrokontroler ESP32. Namun perbedaan tersebut relatif kecil sehingga tidak memengaruhi performa sistem secara keseluruhan. Hasil ini menunjukkan bahwa protokol MQTT mampu menyediakan komunikasi yang stabil dan efisien untuk sistem monitoring kualitas air secara real-time.

Perancangan Sistem Inferensi Fuzzy

Dalam penelitian ini, sistem inferensi fuzzy dirancang melalui tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan (*rule assessment*), dan defuzzifikasi. Tahapan-tahapan tersebut bekerja secara terstruktur untuk mengubah data masukan menjadi keluaran yang memiliki nilai kuantitatif dan dapat diinterpretasikan secara lebih jelas.



Gambar 5. Alur Proses Sistem Fuzzy dalam Klasifikasi Kualitas Air

Berdasarkan Gambar 5 proses inferensi fuzzy dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. **Input Data Sensor**
Tahap awal dimulai dengan memasukkan data hasil pembacaan sensor berupa nilai pH, Total Dissolved Solids (TDS), dan turbidity (kekeruhan). Ketiga parameter tersebut menjadi masukan utama yang digunakan dalam proses penentuan kualitas air.
2. **Fuzzifikasi (*Determining Fuzzy Inference*)**
Pada tahap fuzzifikasi, nilai numerik hasil pembacaan sensor diubah menjadi nilai linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Nilai linguistik tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi parameter air dalam bentuk kategori tertentu. Sebagai contoh:
 - 1) pH → asam, netral, basa
 - 2) TDS → rendah, sedang, tinggi
 - 3) Turbidity → jernih, sedang, keruh
 Proses ini bertujuan mengubah nilai tegas (*crisp value*) menjadi derajat keanggotaan fuzzy dengan rentang nilai antara 0–1.
3. **Evaluasi Aturan (*Rule-Based Inference*)**
Setelah proses fuzzifikasi selesai, sistem melakukan evaluasi terhadap aturan logika fuzzy (*fuzzy rules*) yang telah ditentukan sebelumnya. Aturan tersebut menggunakan format IF–THEN untuk menentukan hubungan antar variabel masukan dan keluaran. Pada tahap ini digunakan operator AND dengan metode MIN untuk menentukan nilai aktivasi dari setiap aturan.
4. **Pembentukan Nilai Tegas (*Crisp Output Generation*)**
Hasil dari seluruh aturan fuzzy selanjutnya digabungkan dan diproses melalui tahap defuzzifikasi menggunakan metode Centroid. Tahap ini bertujuan mengubah hasil fuzzy menjadi satu nilai tegas (*crisp value*) yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan.
5. **Output Kualitas Air**
Berdasarkan hasil defuzzifikasi, sistem menghasilkan keputusan akhir berupa kategori kualitas air, yaitu:
 - 1) Bersih
 - 2) Sedang Tercemar
 - 3) Berbahaya

Keluaran ini memudahkan pengguna dalam memahami kondisi kualitas air tanpa harus menganalisis nilai sensor secara manual.

6. End

Tahap akhir menunjukkan bahwa proses klasifikasi telah selesai dilakukan dan sistem dapat kembali mengulangi proses pembacaan data secara berulang untuk monitoring secara real-time.

Fuzzification

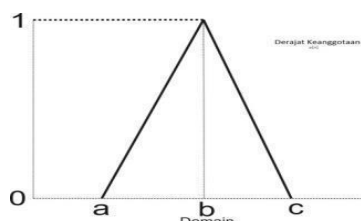
Fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai crisp dari sensor ke dalam fungsi keanggotaan fuzzy. Tabel 2 menunjukkan fungsi keanggotaan yang digunakan dalam penelitian ini, himpunan fuzzy dan rentang nilai yang digunakan untuk setiap parameter [17]. Dalam penelitian ini, fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium digunakan.

Tabel 2. Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Parameter	Nilai	Kategori
pH	< 6,5	Asam
	6,5 – 8,5	Netral
	> 8,5	Basa
TDS	< 250	Rendah
	250 – 750	Sedang
	> 750	Tinggi
Turbidity	< 15	Rendah
	15 – 25	Sedang
	> 25	Tinggi

Sumber : Mu'alim, A. H. M. A. D. 2021

Grafik keanggotaan kurva segitiga:



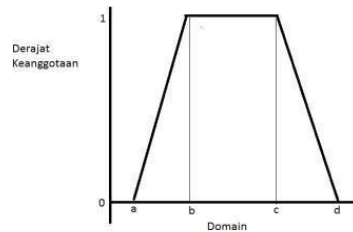
Gambar 6. Grafik keanggotaan kurva segitiga

Sumber: Mu'alim, A. H. M. A. D. 2021

Fungsi keanggotaan segitiga didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ or } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \end{cases} \quad (3)$$

Grafik keanggotaan kurva trapesium:



Gambar 7. Grafik keanggotaan kurva trapesium

Sumber: Mu'alim, A. H. M. A. D. 2021

Fungsi keanggotaan trapesium didefinisikan sebagai:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ or } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \end{cases} \quad (4)$$

Inferensi Fuzzy

Setelah proses fuzzifikasi, maka sistem menerapkan aturan logika fuzzy untuk menghasilkan keluaran berdasarkan kombinasi nilai masukan. Pada tahap ini, operator logika AND digunakan pada setiap aturan fuzzy dan diimplementasikan menggunakan pendekatan interseksi atau metode MIN [18].

$$\alpha_i = \min(\mu_{pH}(x), \mu_{TDS}(y), \mu_{Turbidity}(z)) \quad (5)$$

Keterangan:

α_i : derajat kebenaran (fire strength) dari aturan fuzzy ke-i.

$\mu_{pH}(x)$: derajat keanggotaan nilai pH.

$\mu_{TDS}(y)$: derajat keanggotaan nilai TDS.

$\mu_{Turbidity}(z)$: derajat keanggotaan nilai kekeruhan (turbidity).

Tabel 3. Aturan Fuzzy untuk Penelitian Kualitas Air

No	Aturan Fuzzy
1	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
2	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Bersih
3	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
4	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
5	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
6	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
7	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Berbahaya
8	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Berbahaya
9	JIKA TDS Rendah DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Berbahaya
10	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar

No	Aturan Fuzzy
11	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Bersih
12	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
13	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
14	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
15	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
16	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Berbahaya
17	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Berbahaya
18	JIKA TDS Sedang DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Berbahaya
19	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
20	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
21	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Rendah DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Sedang Tercemar
22	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Berbahaya
23	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Berbahaya
24	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Sedang DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Berbahaya
25	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Asam MAKA Kualitas Air Berbahaya
26	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Netral MAKA Kualitas Air Berbahaya
27	JIKA TDS Tinggi DAN Kekeruhan Tinggi DAN pH Basa MAKA Kualitas Air Berbahaya

Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah tahapan untuk keluaran berbentuk himpunan fuzzy hasil proses inferensi menjadi nilai pasti (crisp) yang menjadikannya bisa dijadikan dasar pada pengambilan keputusan. Pada studi ini, teknik yang diterapkan adalah metode centroid (Center of Area), yaitu pendekatan yang menentukan titik pusat dari kurva fungsi keanggotaan pada bagian output. Nilai tegas yang diperoleh selanjutnya dimanfaatkan untuk menetapkan kalsifikasi kualitas air [19].

$$z^* = \frac{\sum \mu(z_i) \cdot z_i}{\sum \mu(z_i)} \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

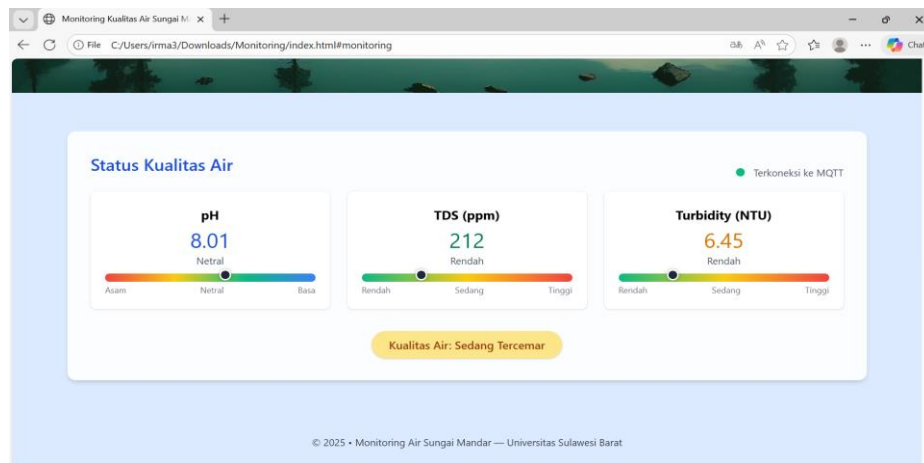
Implementasi Sistem

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pemantauan kualitas air bersih berbasis IoT yang mengukur parameter pH, TDS, serta tingkat kekeruhan terbukti mampu bekerja secara optimal dalam mengawasi kondisi air secara waktu nyata[20]. Sistem mengintegrasikan sensor pH, sensor TDS, dan sensor turbidity dengan mikrokontroler NodeMCU ESP32 sebagai pusat pemrosesan data. Data hasil pembacaan sensor dikirim menggunakan protokol MQTT menuju server web sehingga informasi dapat ditampilkan secara cepat dan berkelanjutan pada antarmuka monitoring.

Selain berfungsi sebagai media pemantauan, sistem juga menerapkan metode logika fuzzy untuk melakukan klasifikasi kualitas air berdasarkan kombinasi nilai parameter yang diperoleh. Pendekatan ini memungkinkan sistem menghasilkan keputusan yang lebih adaptif dibandingkan metode batas ambang konvensional, karena penilaian kualitas air tidak hanya ditentukan oleh satu parameter, tetapi berdasarkan hubungan antarparameter pH, TDS, dan turbidity secara simultan.

Implementasi sistem menunjukkan bahwa komunikasi data antara NodeMCU ESP32 dan web dashboard berjalan stabil dengan latensi yang relatif rendah. Hal ini ditandai dengan pembaruan data sensor secara langsung pada antarmuka web ketika terjadi perubahan nilai pengukuran di sisi sensor. Penggunaan protokol MQTT juga

meningkatkan efisiensi transmisi data karena mekanisme publish-subscribe mampu mengurangi beban komunikasi dibandingkan metode request-response tradisional.



Gambar 8. Tampilan Antarmuka Web Monitoring Kualitas Air Berbasis IoT

Gambar 8 menunjukkan dashboard monitoring menampilkan nilai pH sebesar 8.01 dengan kategori netral, nilai TDS sebesar 212 ppm dengan kategori rendah, dan nilai turbidity sebesar 6.45 NTU dengan kategori rendah. Meskipun parameter pH dan TDS masih berada dalam rentang aman, nilai turbidity yang mulai meningkat mempengaruhi hasil evaluasi fuzzy sehingga sistem mengklasifikasikan kondisi air pada kategori “Sedang Tercemar”. Hasil ini menunjukkan bahwa metode fuzzy mampu memberikan analisis yang lebih sensitif terhadap perubahan parameter kualitas air dibandingkan evaluasi parameter tunggal.

Sebelum sistem digunakan untuk pengambilan data lingkungan, dilakukan tahap kalibrasi sensor untuk memastikan tingkat akurasi pengukuran sesuai dengan standar yang ditetapkan. Tahapan ini penting untuk meminimalkan error pembacaan sensor dan meningkatkan validitas data yang dihasilkan sistem [21], [22]. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor mampu menghasilkan data yang cukup stabil sehingga sistem dapat digunakan sebagai media monitoring kualitas air secara berkelanjutan.

Hasil Kalibrasi Sensor

Sebelum sistem digunakan, dilakukan proses kalibrasi untuk memastikan akurasi sensor

Kalibrasi Sensor Ph

Pengujian ini dilakukan dengan memanfaatkan larutan cairan kalibrasi pH meter (liquid buffer calibration solution) sebanyak 250ml yang masing-masing memiliki nilai pH sebesar 4.01, 6.86, dan 9.18. Proses ini merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa pH memberikan pembacaan yang akurat. Larutan yang digunakan merupakan buffer standar dengan nilai pH yang telah diketahui secara pasti dan telah dikalibrasi sebelumnya. Tabel 4 menyajikan hasil kalibrasi pH.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Pengukuran Sensor pH dengan pH Meter

Hasil Perbandingan			
No	Nilai Sensor	Larutan Buffer	Error %
1.	4.25	4.01	5.98%
2.	6.78	6.86	1.16%
3.	8.95	9.18	2.50%
Nilai rata-rata Error			3.21%

Tabel 4 menyajikan hasil kalibrasi sensor pH yang menunjukkan perbandingan antara pembacaan sensor dan nilai larutan buffer standar. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh rata-rata error sebesar 3.21%, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang cukup baik untuk digunakan dalam monitoring kualitas air. Nilai error yang muncul dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti sensitivitas elektroda sensor, noise pada pembacaan

analog ESP32, kondisi suhu larutan, serta waktu respons sensor saat proses pengukuran. Selain itu, perbedaan kecil antara nilai sensor dan larutan buffer juga dapat disebabkan oleh proses stabilisasi sensor yang belum sepenuhnya konstan. Meskipun demikian, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan pembacaan yang relatif mendekati nilai standar sehingga layak digunakan dalam proses pengambilan data lingkungan.

Kalibrasi Sensor TDS

Langkah selanjutnya adalah proses kalibrasi sensor TDS, penelitian menggunakan dua jenis sampel air dengan konsentrasi zat terlarut yang berbeda guna memastikan akurasi kinerja sensor. Salah satu sampel yang digunakan adalah air keran yang diukur menggunakan larutan kalibrasi TDS (TDS calibration solution) dengan konsentrasi 500 ppm yang telah memiliki nilai pasti [23]. Melalui variasi ini, peneliti dapat menyetel sensor agar mampu mendeteksi tingkat total zat terlarut secara tepat, baik pada air dengan tingkat kejernihan tinggi maupun pada air dengan konsentrasi zat terlarut yang lebih tinggi. Tabel 5 menyajikan hasil kalibrasi TDS.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Pengukuran Sensor TDS dengan Nilai Aktual

Hasil Perbandingan			
No	Nilai Sensor	Nilai Aktual	Error %
1.	535	500	7%
2.	460	485	5.15%
Nilai rata-rata Error			6.07%

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 5 sensor TDS memperoleh rata-rata error sebesar 6.07%, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang cukup baik untuk diterapkan pada sistem monitoring kualitas air. Perbedaan nilai antara sensor dan nilai aktual dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti sensitivitas probe sensor, kualitas tegangan input, suhu air, serta gangguan noise pada pembacaan analog mikrokontroler ESP32. Selain itu, kondisi larutan dan kestabilan sensor saat proses pengukuran juga dapat memengaruhi hasil pembacaan. Meskipun terdapat selisih pengukuran, sensor tetap mampu memberikan data yang relatif mendekati nilai aktual sehingga layak digunakan dalam proses pemantauan kualitas air secara real-time.

Kalibrasi Sensor Turbidity

Kalibrasi sensor kekeruhan (*turbidity sensor*) menggunakan sampel air dilakukan untuk memastikan pembacaan sensor sesuai dengan nilai kekeruhan dalam satuan NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). Pada penelitian ini digunakan tiga jenis sampel air dengan tingkat kekeruhan yang berbeda, yaitu air bersih, air sedang tercemar, dan air berbahaya. Jumlah sampel yang digunakan mengacu pada penelitian terdahulu yang menggunakan tiga kategori tingkat kualitas air sebagai representasi kondisi air berdasarkan variasi tingkat kekeruhan. Tabel 6 menyajikan hasil kalibrasi sensor turbidity.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Pengukuran Sensor Turbidity

Sampel	Perlakuan	Nilai Turbidity (NTU)	Kategori
1.	Air bersih	3.40	Bersih
2.	Air + ½ sendok makan tanah	14.24	Sedang Tercemar
3.	Air + 1 sendok makan tanah	25	Berbahaya

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 6, sensor turbidity mampu membedakan tingkat kekeruhan air dengan baik. Sampel air bersih menghasilkan nilai 3,40 NTU dan dikategorikan sebagai air bersih, sedangkan penambahan tanah menyebabkan peningkatan nilai kekeruhan menjadi 14,24 NTU pada kategori sedang tercemar dan 25 NTU pada kategori berbahaya. Peningkatan nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang baik terhadap perubahan jumlah partikel tersuspensi di dalam air.

Meskipun jumlah sampel kalibrasi yang digunakan terbatas, penggunaan tiga sampel pada penelitian ini bertujuan untuk merepresentasikan tiga kondisi utama kualitas air, yaitu bersih, sedang tercemar, dan berbahaya sesuai dengan acuan penelitian sebelumnya. Ketiga kategori tersebut dianggap cukup untuk proses pengujian awal sistem dalam mengenali perubahan tingkat kekeruhan air.

Selain itu, hasil pembacaan sensor masih berpotensi mengalami error yang dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor tersebut meliputi intensitas cahaya LED dan sensitivitas *photodetector* pada sensor, posisi sensor yang kurang konsisten saat proses pengukuran, distribusi partikel tanah yang belum homogen, serta gangguan cahaya dari lingkungan sekitar. Kepadatan partikel yang tidak merata dapat menyebabkan penyebaran cahaya yang berbeda sehingga memengaruhi nilai yang terbaca oleh sensor. Selain itu, getaran atau pergerakan air selama proses pengukuran juga dapat menyebabkan fluktuasi pembacaan sensor. Meskipun terdapat potensi error, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor turbidity mampu bekerja secara konsisten sehingga layak digunakan pada sistem monitoring kualitas air berbasis IoT.

Hasil Pengujian Sistem

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh secara langsung melalui pengukuran menggunakan sensor pH, TDS, dan kekeruhan. Proses pengambilan data dilakukan secara *real-time* tanpa memanfaatkan dataset sekunder maupun dataset publik. Jumlah data yang diperoleh sebanyak 27 sampel untuk masing-masing parameter yang dikumpulkan selama periode 7 hari dengan frekuensi pengukuran sebanyak tiga kali dalam sehari. Tabel 7 menyajikan hasil pengujian sensor.

Tabel 7. Data Hasil Pengujian Sensor

Hari	Jam	pH	TDS	Turbidity	Kualitas
1.	08:31	8.22	210 ppm	9.11 NTU	Sedang Tercemar
	12:05	8.17	204 ppm	9.02 NTU	Sedang Tercemar
	16:00	8.02	210 ppm	9.10 NTU	Sedang Tercemar
2.	08:10	8.56	272 ppm	8.01 NTU	Sedang Tercemar
	12:10	8.89	291 ppm	9.19 NTU	Sedang Tercemar
	16:15	8.78	269 ppm	9.07 NTU	Sedang Tercemar
3.	08:00	8.38	221 ppm	8.52 NTU	Sedang Tercemar
	12:20	8.27	237 ppm	8.30 NTU	Sedang Tercemar
	16:05	8.19	229 ppm	8.29 NTU	Sedang Tercemar
4.	08:10	8.68	232 ppm	10.10 NTU	Sedang Tercemar
	12:10	8.62	235 ppm	10.27 NTU	Sedang Tercemar
	16:15	8.60	238 ppm	10.80 NTU	Sedang Tercemar
5.	08:05	8.55	235 ppm	9.36 NTU	Sedang Tercemar
	12:30	8.50	217 ppm	8.95 NTU	Sedang Tercemar
	16:00	8.10	218 ppm	8.64 NTU	Sedang Tercemar
6.	08:15	7.73	210 ppm	7.90 NTU	Sedang Tercemar
	12:15	7.59	208 ppm	7.21 NTU	Sedang Tercemar
	16:20	7.21	203 ppm	7.15 NTU	Sedang Tercemar
7.	08:00	7.10	211 ppm	6.58 NTU	Sedang Tercemar
	12:30	7.00	210 ppm	6.37 NTU	Sedang Tercemar
	16:00	7.01	216 ppm	6.10 NTU	Sedang Tercemar

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7, sebagian besar data yang diperoleh menghasilkan kategori **sedang tercemar**. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa nilai parameter kualitas air selama periode pengujian relatif berada pada rentang yang sama, khususnya pada parameter kekeruhan (*turbidity*) yang berkisar antara 6–10 NTU serta nilai TDS yang cenderung stabil pada rentang 200–290 ppm. Hal ini menyebabkan hasil klasifikasi sistem lebih dominan pada satu kategori.

Dominasi kategori yang sama pada hasil pengujian dipengaruhi oleh kondisi sampel air yang digunakan selama penelitian. Pengambilan data dilakukan pada sumber air dengan karakteristik yang relatif stabil sehingga variasi perubahan kualitas air tidak terlalu besar. Oleh karena itu, sistem lebih banyak menghasilkan keluaran kategori sedang tercemar.

Selain itu, selama proses implementasi ditemukan adanya ketidaksesuaian pada tampilan hasil klasifikasi di sistem web. Beberapa data sensor yang menunjukkan perubahan nilai parameter masih menghasilkan keluaran kategori yang sama. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh implementasi logika klasifikasi pada sistem web yang belum sepenuhnya merepresentasikan aturan sistem inferensi fuzzy yang digunakan. Meskipun demikian, data hasil

pembacaan sensor tetap menggunakan data pengukuran asli yang diperoleh secara langsung di lapangan tanpa dilakukan perubahan terhadap nilai hasil pengukuran.

Untuk memperoleh variasi kategori yang lebih beragam, penelitian selanjutnya dapat menggunakan sampel air dengan karakteristik yang lebih bervariasi, misalnya air bersih, air limbah rumah tangga, maupun air dengan tingkat pencemaran yang lebih tinggi sehingga sistem dapat diuji pada lebih banyak kondisi kualitas air.

Selain data yang diperoleh dari sensor, pengukuran juga dilakukan menggunakan alat ukur standar sebagai data pembandingan (data aktual). Data tersebut dimanfaatkan untuk menilai tingkat akurasi sistem dalam membaca parameter kualitas air. Pengambilan data aktual dilakukan bersamaan dengan pengambilan data sensor guna menjaga konsistensi dalam proses perbandingan. Hasil pengukuran data aktual disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Aktual

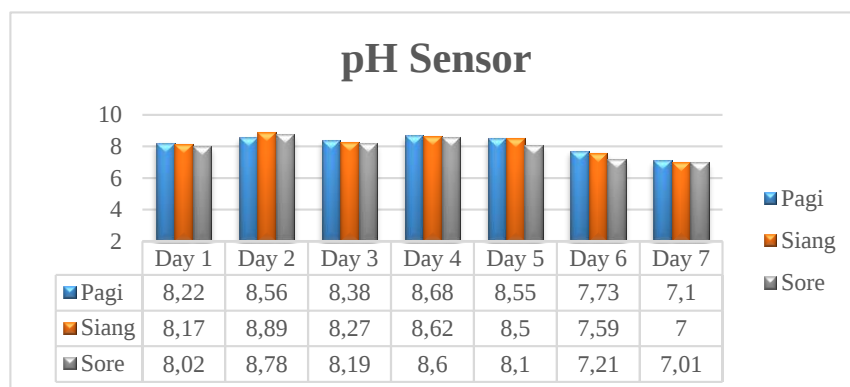
Day	Jam	pH	TDS	Turbidity
1.	08:31	8.15	208 ppm	8.89 NTU
	12:05	8.05	204 ppm	8.60 NTU
	16:00	7.96	202 ppm	8.45 NTU
2.	08:10	8.41	244 ppm	8.01 NTU
	12:10	8.65	264 ppm	8.78 NTU
	16:15	8.51	232 ppm	8.40 NTU
3.	08:00	8.29	218 ppm	8.32 NTU
	12:20	8.21	223 ppm	8.30 NTU
	16:05	8.19	212 ppm	8.29 NTU
4.	08:10	8.55	222 ppm	9.85 NTU
	12:10	8.49	210 ppm	9.75 NTU
	16:15	8.35	208 ppm	9.70 NTU
5.	08:05	8.29	220 ppm	9.20 NTU
	12:30	8.15	215 ppm	8.85 NTU
	16:00	8.09	216 ppm	8.51 NTU
6.	08:15	7.67	205 ppm	7.50 NTU
	12:15	7.41	202 ppm	7.15 NTU
	16:20	7.11	206 ppm	7.00 NTU
7.	08:00	7.05	205 ppm	6.41 NTU
	12:30	6.95	200 ppm	6.32 NTU
	16:00	6.45	210 ppm	6.10 NTU

Perbandingan Grafik Data Sensor dan Data Aktual

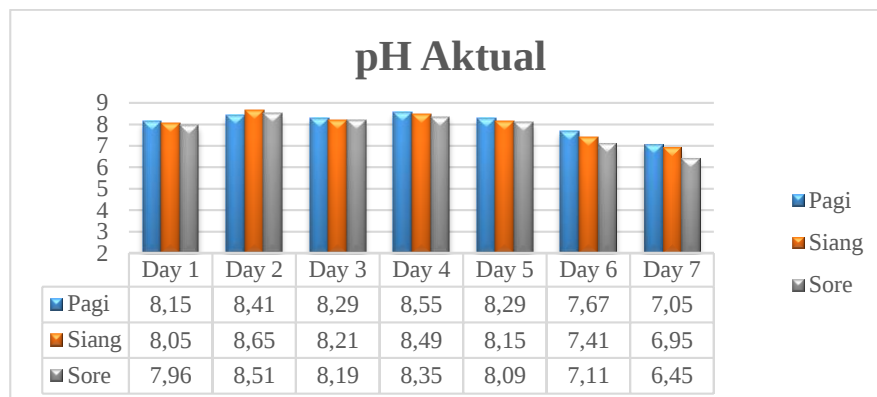
Untuk menilai kinerja sistem monitoring, dilakukan perbandingan antara data yang diperoleh dari sensor dengan data aktual hasil pengukuran menggunakan alat standar. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk mengetahui tingkat keakuratan sistem dalam memantau parameter kualitas air. Hasil perbandingan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk parameter pH, TDS, dan turbidity.

Grafik pH Sensor dan Data Aktual

Berikut merupakan gambar grafik data pH sensor dan Aktual:



Gambar 9. Grafik Data Sensor pH



Gambar 10. Grafik Data Aktual

Berdasarkan grafik perbandingan pH sensor dan data aktual, terlihat bahwa pola perubahan nilai pH yang dihasilkan sensor memiliki kecenderungan yang sama dengan data aktual. Nilai pH pada kedua grafik menunjukkan kondisi air yang berada pada rentang basa lemah menuju netral, dengan tren penurunan secara bertahap dari hari pertama hingga hari ketujuh.

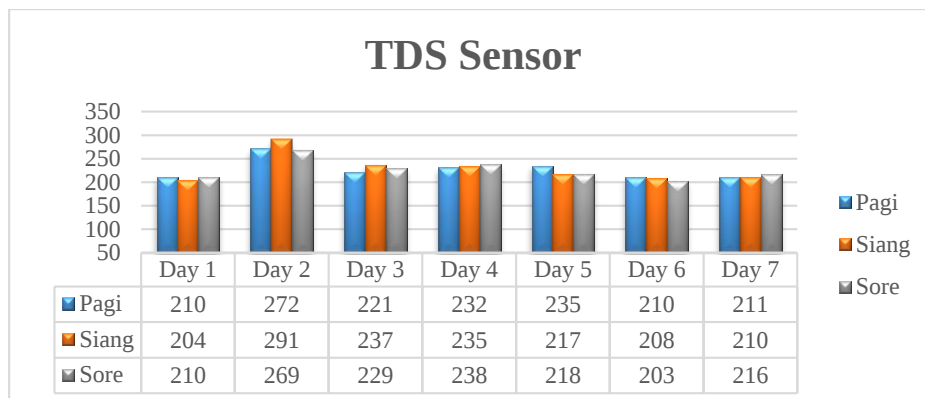
Pada hari ke-1 hingga hari ke-5, nilai pH relatif stabil pada kisaran 8,0–8,8. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas air masih berada dalam kategori baik dan cenderung basa lemah. Memasuki hari ke-6 dan hari ke-7, terjadi penurunan nilai pH baik pada data sensor maupun data aktual. Penurunan tersebut mengindikasikan adanya perubahan kondisi kualitas air yang mendekati netral.

Hasil pembacaan sensor juga menunjukkan selisih nilai yang relatif kecil dibandingkan data aktual. Rata-rata perbedaan pembacaan berada pada rentang sekitar 0,05–0,30 pH. Selisih tersebut masih tergolong rendah dan menunjukkan bahwa sensor pH mampu merepresentasikan kondisi air dengan cukup akurat. Perbedaan kecil yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti sensitivitas sensor, proses kalibrasi, kondisi lingkungan, serta kemungkinan adanya noise pada pembacaan sensor.

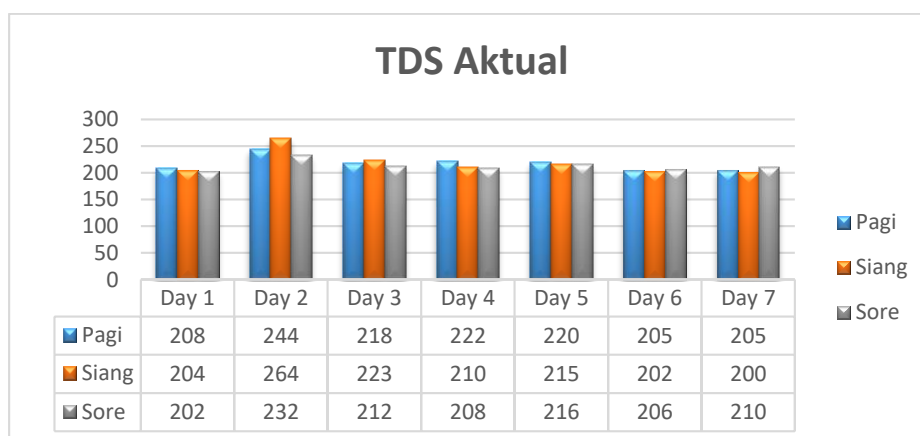
Selain itu, pola grafik sensor yang mengikuti bentuk grafik aktual menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu bekerja secara konsisten dalam memantau perubahan kualitas air secara real-time. Dengan demikian, sensor pH yang digunakan pada penelitian ini dapat dinilai memiliki performa yang baik dan layak digunakan untuk sistem monitoring kualitas air secara berkelanjutan.

Grafik TDS Sensor dan Data Aktual

Berikut merupakan gambar grafik Data TDS sensor dan Aktual:



Gambar 11. Grafik Data TDS Sensor



Gambar 12. Grafik Data TDS Aktual

Berdasarkan grafik perbandingan TDS sensor dan data aktual, terlihat bahwa pola perubahan nilai TDS yang dihasilkan sensor memiliki kecenderungan yang hampir sama dengan data aktual. Nilai TDS pada kedua grafik mengalami kenaikan signifikan pada hari ke-2, kemudian cenderung menurun dan stabil hingga hari ke-7. Pola tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu mengikuti perubahan konsentrasi zat terlarut dalam air dengan cukup baik.

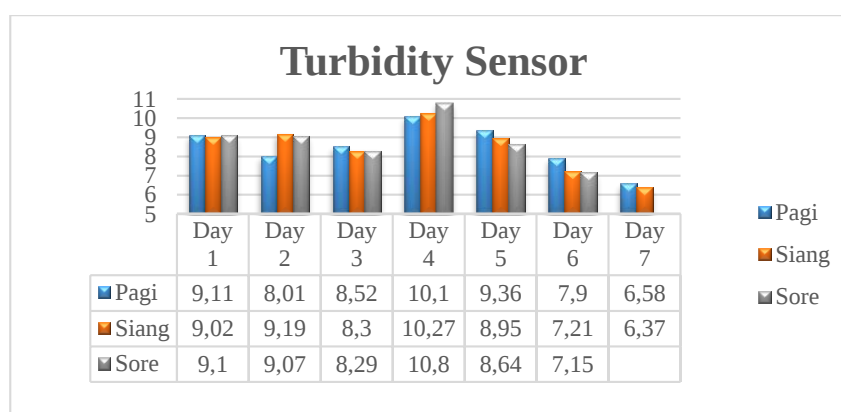
Pada hari ke-2, nilai TDS mengalami peningkatan paling tinggi baik pada data sensor maupun data aktual. Data sensor menunjukkan nilai tertinggi sebesar 291 ppm pada siang hari, sedangkan data aktual mencapai 264 ppm. Kondisi ini mengindikasikan adanya peningkatan jumlah zat terlarut dalam air pada periode tersebut. Setelah hari ke-2, nilai TDS pada kedua grafik mengalami penurunan secara bertahap hingga berada pada kisaran 200–220 ppm.

Meskipun pola grafik sensor mengikuti data aktual, terdapat beberapa selisih nilai pembacaan antara sensor dan alat ukur standar. Selisih terbesar terlihat pada hari ke-2, sedangkan pada hari-hari berikutnya nilai sensor cenderung mendekati data aktual. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh sensitivitas sensor terhadap suhu air, kandungan ion terlarut, proses kalibrasi sensor, serta adanya gangguan noise saat pengambilan data.

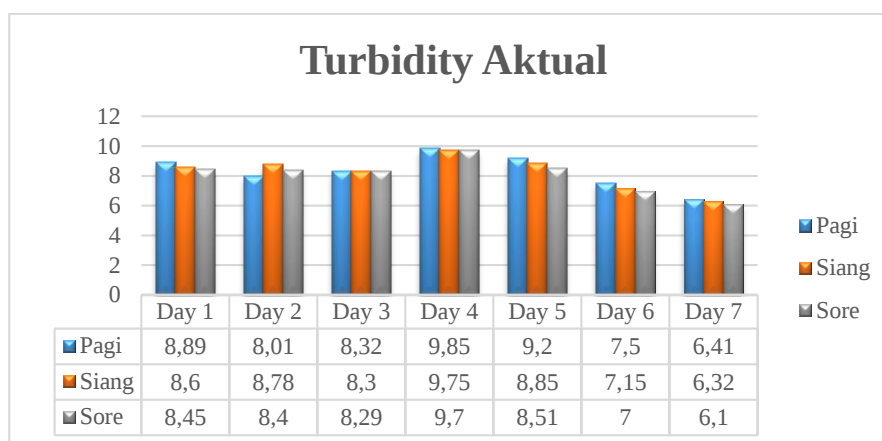
Selain itu, grafik sensor menunjukkan fluktuasi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan data aktual. Hal ini menunjukkan bahwa sensor TDS memiliki sensitivitas yang cukup tinggi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Namun demikian, secara keseluruhan pola pembacaan sensor tetap konsisten mengikuti tren data aktual sehingga sistem monitoring berbasis IoT mampu memberikan representasi kondisi kualitas air secara real-time dengan tingkat akurasi yang cukup baik.

Grafik Turbidity Sensor dan Data Aktual

Berikut merupakan gambar grafik Data Turbidity sensor dan Aktual:



Gambar 13. Grafik Data Turbidity Sensor



Gambar 14. Grafik Data Turbidity Aktual

Berdasarkan grafik, nilai kekeruhan air yang diperoleh dari sensor menunjukkan pola yang hampir sama dengan data aktual. Pada kedua grafik terlihat bahwa nilai turbidity mengalami peningkatan secara bertahap dari hari pertama hingga mencapai nilai tertinggi pada hari ke-4, kemudian mengalami penurunan pada hari-hari berikutnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi perubahan tingkat kekeruhan air secara konsisten.

Pada data sensor, nilai tertinggi tercatat pada hari ke-4 dengan rentang sekitar 10.1–10.8 NTU, sedangkan pada data aktual nilai tertinggi berada pada kisaran 9.7–9.85 NTU. Selisih nilai antara sensor dan data aktual relatif kecil, sehingga menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor cukup mendekati kondisi sebenarnya. Selain itu, pola penurunan setelah hari ke-4 juga terlihat serupa pada kedua grafik, yang menandakan bahwa sensor memiliki tingkat respons yang baik terhadap perubahan kualitas air.

Meskipun terdapat sedikit perbedaan nilai antara data sensor dan data aktual, perbedaan tersebut masih dalam batas yang wajar. Selisih ini dapat disebabkan oleh faktor kalibrasi sensor, kondisi lingkungan, maupun gangguan pada proses pembacaan data. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor turbidity yang digunakan mampu merepresentasikan tingkat kekeruhan air dengan cukup baik dan layak digunakan dalam sistem monitoring kualitas air berbasis IoT.

Pembahasan Sistem

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi ESP32 dan Logika Fuzzy Mamdani mampu meningkatkan Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi mikrokontroler ESP32 dengan metode Logika Fuzzy Mamdani mampu meningkatkan proses evaluasi kualitas air dibandingkan pendekatan konvensional yang hanya menampilkan data mentah sensor. Sistem yang dikembangkan dapat mengubah data numerik dari sensor pH, TDS, dan turbidity menjadi informasi kualitatif berupa kategori kualitas air sehingga lebih mudah dipahami oleh pengguna. Metode fuzzy juga terbukti efektif dalam menangani ketidakpastian data dan menjaga kestabilan keputusan meskipun terjadi fluktuasi pada nilai sensor [11] [18].

Berdasarkan hasil kalibrasi, sensor pH memiliki rata-rata kesalahan sebesar 3,21% dan sensor TDS sebesar 6,07%. Nilai error tersebut masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk sistem monitoring berbasis IoT [16]. Perbedaan nilai antara sensor dan data aktual dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan dan karakteristik sensor. Pada sensor TDS, perubahan suhu air dapat memengaruhi konduktivitas listrik sehingga nilai TDS cenderung berubah ketika suhu meningkat atau menurun. Selain itu, kandungan ion terlarut seperti mineral, garam, dan zat organik juga memengaruhi hasil pembacaan TDS karena sensor bekerja berdasarkan kemampuan larutan menghantarkan arus listrik. [3].

Pada parameter pH, perubahan nilai dipengaruhi oleh kandungan mineral dan senyawa kimia yang terdapat di dalam air. Air dengan kandungan mineral tertentu, seperti kalsium dan magnesium, cenderung memiliki nilai pH yang lebih tinggi atau bersifat basa. Hal ini terlihat pada hasil pengukuran hari pertama hingga hari keempat yang menunjukkan nilai pH berada pada kondisi basa ringan sebelum mengalami penurunan menuju kondisi netral pada hari berikutnya. Penurunan tersebut diduga dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan dan komposisi zat terlarut di dalam air.

Hasil pengukuran turbidity menunjukkan pola peningkatan hingga hari ke-4 kemudian menurun pada hari berikutnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi perubahan tingkat kekeruhan air secara konsisten. Peningkatan nilai kekeruhan dapat dipengaruhi oleh adanya sedimen, partikel tanah, lumpur, maupun

bahan organik tersuspensi di dalam air. Faktor lingkungan seperti curah hujan juga berpotensi meningkatkan jumlah partikel tersuspensi sehingga nilai turbidity menjadi lebih tinggi [2] [3]. Setelah kondisi lingkungan kembali stabil, partikel-partikel tersebut mulai mengendap sehingga nilai kekeruhan mengalami penurunan.

Selain faktor lingkungan, kestabilan sistem juga dipengaruhi oleh noise sensor dan fluktuasi sinyal analog, terutama pada sensor turbidity yang sensitif terhadap cahaya dan kondisi air. Noise menyebabkan pembacaan sensor terkadang mengalami perubahan kecil meskipun kondisi air relatif sama. Pada penelitian ini belum diterapkan metode filtering data seperti moving average atau Kalman filter, sehingga data yang digunakan merupakan hasil pembacaan langsung dari sensor. Kondisi tersebut menjadi salah satu penyebab adanya selisih nilai antara data sensor dan data aktual.

Seluruh data hasil pengamatan selama 7 hari diklasifikasikan ke dalam kategori “Sedang Tercemar”. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan multi-parameter menggunakan kombinasi pH, TDS, dan turbidity mampu memberikan evaluasi kualitas air yang lebih representatif dibandingkan penggunaan satu parameter saja [4]. Dengan adanya integrasi fuzzy, sistem tidak hanya menampilkan nilai sensor, tetapi juga mampu memberikan interpretasi kondisi air secara otomatis berdasarkan aturan yang telah ditentukan.

Secara keseluruhan, sistem berhasil melakukan monitoring kualitas air secara real-time dan mendukung proses pengambilan keputusan melalui antarmuka berbasis web. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi teknologi IoT, komunikasi MQTT, dan Logika Fuzzy Mamdani dalam satu sistem monitoring kualitas air rumah tangga yang mampu memberikan klasifikasi kualitas air secara otomatis dan mudah dipahami pengguna.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain belum diterapkannya metode filtering untuk mereduksi noise sensor serta jumlah data pengujian yang masih terbatas pada 27 sampel selama 7 hari pengamatan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan metode filtering data, meningkatkan jumlah dan variasi data pengujian, serta mengintegrasikan fitur notifikasi otomatis agar sistem dapat memberikan peringatan dini ketika kualitas air berada pada kondisi berbahaya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT yang diintegrasikan dengan Logika Fuzzy Mamdani berhasil dikembangkan dan mampu melakukan monitoring secara real-time serta mengubah data sensor menjadi informasi kualitatif yang mudah dipahami. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor pH memiliki kesalahan rata-rata 3,21% dan TDS sebesar 6,07%, yang masih dalam batas toleransi, sementara sensor kekeruhan mampu mendeteksi perubahan kondisi air dengan baik. Sistem juga mampu mengikuti pola data aktual dengan akurasi yang memadai, di mana kualitas air selama pengamatan diklasifikasikan sebagai “Sedang Tercemar” yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan metode Logika Fuzzy Mamdani yang mampu mengolah kombinasi beberapa parameter kualitas air, yaitu pH, TDS, dan turbidity, sehingga menghasilkan evaluasi kualitas air yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu parameter saja. Integrasi ESP32, sensor kualitas air, komunikasi MQTT, dan antarmuka berbasis web juga memungkinkan sistem melakukan monitoring dan pengambilan keputusan secara otomatis dan real-time. Namun, sistem masih memiliki keterbatasan, seperti belum adanya filtering untuk mengurangi noise sensor dan jumlah data pengujian yang masih terbatas, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi dan keandalan sistem. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan metode filtering data, memperbanyak jumlah sampel pengujian, serta mengembangkan fitur notifikasi otomatis agar sistem dapat memberikan peringatan dini ketika kualitas air berada pada kondisi yang tidak aman.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Arifin, R. Agustiani, Y. Lashania, G. Elsandika, And I. Sina, “Sistem Monitoring Ph Air , Total Dissolved Solids (Tds) Dan Kekeruhan Air Pada Tandon Berbasis Internet Of Things (Iot),” Vol. 5, No. 2, Pp. 462–471, 2025.
- [2] R. H. Fuzia Akbar, Tati Erlina, “Journal On Computer Hardware , Signal Processing , Embedded System And Networking,” Vol. 01, Pp. 5–10, 2024.
- [3] T. Rikanto And A. Witanti, “Sistem Monitoring Kualitas Kekeruhan Air Berbasis Internet Of Thing,” Vol. 11, No. 2, Pp. 87–90, 2021.
- [4] H. Fakhurroja, E. Triono, And A. Munandar, “Journal Of Mechatronics , Electrical Power , Water Quality Assessment Monitoring System Using Fuzzy Logic And The Internet Of Things,” Vol. 14, No. 2, Pp. 198–207, 2023.
- [5] F. Jan, N. Min-Allah, And D. Dü, “Iot Based Smart Water Quality Monitoring : Recent Techniques , Trends And Challenges For Domestic Applications,” Pp. 1–37, 2021.
- [6] N. Bawankar, A. Kriti, S. S. Chouhan, And S. Chaudhari, “Iot-Enabled Water Monitoring In Smart Cities With

- Retrofit And Solar-Based Energy Harvesting,” *Ieee Access*, Vol. 12, No. April, Pp. 58222–58238, 2024, Doi: 10.1109/Access.2024.3392852.
- [7] K. Lal, S. Menon, F. Noble, K. Mahmood, And A. Id, “Low-Cost Iot Based System For Lake Water Quality Monitoring,” Pp. 1–21, 2024, Doi: 10.1371/Journal.Pone.0299089.
- [8] S. Kumar, N. Pudota, B. Sri, And G. A. Shweta, “Advancing Aquaculture : Fuzzy Logic - Based Water Quality Monitoring And Maintenance System For Precision Aquaculture,” *Aquac. Int.*, Vol. 33, No. 1, Pp. 1–21, 2025, Doi: 10.1007/S10499-024-01701-2.
- [9] N. Kavyashree, M. C. Supriya, And M. R. Lokesh, “Site Reliability Engineering For Ios Mobile Application In Small-Medium,” *Glob. Transitions Proc.*, Vol. 2, No. 2, Pp. 137–144, 2021, Doi: 10.1016/J.Gltp.2021.08.065.
- [10] C. Cohen-Manrique, S. Camacho-Leon, And J. L. Villa, “Emerging Trends In Iot For Aquatic Systems : A Systematic Literature Review,” No. December, Pp. 1–18, 2025, Doi: 10.3389/Frwa.2025.1699240.
- [11] L. M. Silalahi, I. Uli, V. Simanjuntak, And M. Maharani, “Sistem Kendali Fuzzy Mamdani Berbasis Iot Untuk Optimalisasi Tangki Air Iot-Based Fuzzy Mamdani Control System For Water Tank Optimization,” Vol. 4, No. 6, Pp. 233–245, 2024.
- [12] D. I. Elriyan, A. R. Chaidir, And K. Anam, “Pengendalian Kualitas Air Minum Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet Of Things,” 2025.
- [13] H. Mrabet, S. Belguith, A. Alhomoud, And A. Jemai, “A Survey Of Iot Security Based On A Layered,” Pp. 1–19, 2020, Doi: 10.3390/S20133625.
- [14] A. Setia, S. Ariyanto, And D. N. Triwibowo, “Implementasi Dan Evaluasi Kinerja Sistem Iot Multi-Sensor Berbasis Esp32 Untuk Pemantauan Dan Peringatan Dini Lingkungan Secara Real-Time,” Vol. 09, No. 1, Pp. 118–125, 2026.
- [15] N. Azreen *Et Al.*, “Heliyon Improved Accuracy In Iot-Based Water Quality Monitoring For Aquaculture Tanks Using Low-Cost Sensors : Asian Seabass Fish Farming,” *Heliyon*, Vol. 10, No. 8, P. E29022, 2024, Doi: 10.1016/J.Heliyon.2024.E29022.
- [16] H. J. J. Ochoa, R. Peña, Y. L. Mezquita, E. Gonzalez, And S. Camacho-Leon, “Comparative Analysis Of Power Consumption Between Mqtt And Http Protocols In An Iot Platform Designed And Cold Chain Transport Operations,” 2023.
- [17] A. H. M. A. D. Mu’alim, *Sistem Peringatan Dini Kualitas Air Sumur Berbasis*. 2021.
- [18] C. N. Insani And N. Arifin, “Iot-Enabled Real-Time Monitoring And Tsukamoto Fuzzy Classification Of Mandar River Water Quality Via Web Integration For Sustainable Resource Management,” Vol. 6, No. 5, Pp. 3079–3092, 2025.
- [19] O. R. Putri, W. Sudarwati, S. Wardah, And U. Marfuah, “Aplikasi Sistem Inferensi Fuzzy Metode Mamdani Untuk Memprediksi Jumlah Produksi Pakaian Pada Industri Kreatif Fesyen,” No. April, 2024.
- [20] S. Safitri *Et Al.*, “Sistem Kontrol Dan Monitoring Pemberi Pakan Ikan Otomatis Berbasis Iot,” Vol. 1, No. 1, Pp. 74–82, 2022, Doi: 10.70247/Jumistik.V1i1.12.
- [21] T. N. Nizar, D. A. Jatmiko, R. Hartono, And Y. Y. Kerlooza, “Komputika : Jurnal Sistem Komputer Kalibrasi Sensor Monitoring Cuaca Pada Area Lokal Untuk Meningkatkan Akurasi Pada Sensor Biaya Rendah Calibration Of Weather Monitoring Sensors In Local Areas To Improve Accuracy In Low-Cost Sensors,” Vol. 13, Pp. 277–287, 2024, Doi: 10.34010/Komputika.V13i2.13949.
- [22] A. Febriansyah, A. Zahri, And D. Amanda, “Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur Monitoring Kadar Air Berdasarkan Kadar Ph , Tingkat,” Vol. 16, No. 01, 2024.
- [23] W. T. Saputra, E. C. Prima, M. Cahyana, B. Fajar, Y. Amadudin, And R. M. Ashidiq, “Iot-Mqtt Protocol-Based Water Sensor System To Monitor Citarum River Water Quality Using Arduino Uno R4 Wifi,” Vol. 9, No. 1, Pp. 11–22, 2025.