



Sistem Monitoring Kualitas Air Artesis Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Fuzzy Mamdani

Aldi Nayaka Putra*, Alauddin Maulana Hirzan

Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi, Program Studi S-1 Teknik Informatika, Universitas Semarang, Semarang, Indonesia

Email: ^{1,*}putranayaka05@gmail.com, ²maulanahirzan@usm.ac.id

Email Penulis Korespondensi: putranayaka05@gmail.com

Abstrak—Kualitas air merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat sehingga diperlukan pemantauan secara berkala untuk memastikan kondisi air tetap layak digunakan. Namun, proses monitoring kualitas air yang masih dilakukan secara manual memiliki keterbatasan karena tidak mampu memberikan informasi secara kontinu dan real-time. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring kualitas air artesis berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan metode Fuzzy Mamdani untuk melakukan pemantauan serta klasifikasi kualitas air secara otomatis. Sistem menggunakan sensor pH-4502C, sensor turbidity, dan sensor suhu DS18B20 sebagai parameter masukan. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor pada kondisi air mengalir, diterapkan metode moving average dan flow chamber berbahan thinwall. Data hasil pengukuran ditampilkan pada LCD I2C 16×2 dan dikirimkan ke platform ThingSpeak secara real-time. Pengujian dilakukan selama satu jam dengan interval pengambilan data 20 detik sehingga diperoleh 179 data pengamatan. Hasil pengujian menunjukkan nilai rata-rata pH sebesar 6,10, tegangan sensor turbidity sebesar 2,61 V, dan suhu sebesar 28,8°C. Validasi sensor pH terhadap pH meter menghasilkan rata-rata selisih sebesar 0,0075 pH. Hasil klasifikasi menggunakan metode Fuzzy Mamdani menghasilkan nilai crisp rata-rata sebesar 30,66 yang termasuk kategori Buruk. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi flow chamber, moving average, dan metode Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan monitoring dan klasifikasi kualitas air secara otomatis serta real-time.

Kata Kunci: Monitoring Kualitas Air; Internet of Things; ESP32; Fuzzy Mamdani; ThingSpeak

Abstract—Water quality is an important factor that influences public health, so regular monitoring is needed to ensure that the water remains suitable for use. However, the manual water quality monitoring process has limitations because it is unable to provide continuous and real-time information. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based artesian water quality monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Mamdani Fuzzy method to automatically monitor and classify water quality. The system uses a pH-4502C sensor, a turbidity sensor, and a DS18B20 temperature sensor as input parameters. To improve the stability of sensor readings in flowing water conditions, a moving average method and a thinwall flow chamber are applied. The measurement data are displayed on a 16×2 I2C LCD and sent to the ThingSpeak platform in real-time. The test was carried out for one hour with a data collection interval of 20 seconds, resulting in 179 observation data. The test results show an average pH value of 6.10, a turbidity sensor voltage of 2.61 V, and a temperature of 28.8°C. Validation of the pH sensor against the pH meter yielded an average difference of 0.0075 pH. Classification results using the Fuzzy Mamdani method yielded an average crisp value of 30.66, which is categorized as Poor. The contribution of this research lies in the integration of the flow chamber, moving average, and the Fuzzy Mamdani method to produce automatic and real-time water quality monitoring and classification.

Keywords: Water Quality Monitoring; Internet of Things; ESP32; Fuzzy Mamdani; ThingSpeak

1. PENDAHULUAN

Air artesis merupakan salah satu sumber air yang banyak dimanfaatkan masyarakat untuk kebutuhan konsumsi, sanitasi, dan aktivitas domestik lainnya. Meskipun berasal dari lapisan tanah yang relatif terlindungi, kualitas air artesis tetap berpotensi mengalami penurunan akibat aktivitas manusia, kondisi lingkungan, maupun faktor geologi. Perubahan kualitas air yang tidak terdeteksi dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan karena air dapat mengandung zat pencemar atau memiliki karakteristik fisika dan kimia yang tidak sesuai standar. Oleh karena itu, pemantauan kualitas air artesis secara berkala menjadi penting untuk memastikan kelayakan air yang digunakan masyarakat. Penelitian mengenai analisis kualitas sumber air menunjukkan bahwa parameter fisika dan kimia seperti pH, suhu, dan kandungan zat terlarut menjadi indikator penting dalam menentukan kondisi kualitas suatu sumber air [1].

Proses monitoring kualitas air umumnya masih dilakukan secara manual melalui penggunaan alat ukur portabel maupun melalui pengujian laboratorium sehingga memiliki beberapa keterbatasan, seperti tidak mampu memberikan informasi secara kontinu, membutuhkan keterlibatan operator, serta kurang efektif dalam mendeteksi perubahan kualitas air secara cepat. Selain itu, hasil nilai pembacaan sensor pada kondisi air mengalir sering mengalami fluktuasi akibat gangguan (*noise*) sehingga diperlukan proses pengolahan data untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih stabil dan representatif. Penelitian mengenai sistem monitoring kualitas air menunjukkan bahwa penggunaan sensor secara langsung dapat menghasilkan variasi nilai pembacaan sehingga diperlukan metode pengolahan data agar sistem mampu memberikan hasil yang lebih akurat dan mudah dianalisis [2]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau kualitas air secara berkelanjutan agar perubahan kondisi air dapat diketahui sejak dini.

Berbagai penelitian mengenai monitoring kualitas air berbasis IoT telah banyak dilakukan. Penelitian oleh Latipah dan Alamsyah mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis metode Fuzzy Mamdani untuk mengidentifikasi kelayakan air konsumsi dengan memanfaatkan parameter pH, suhu, dan tingkat kekeruhan air. Sistem tersebut mampu menentukan status kualitas air berdasarkan hasil pembacaan sensor yang kemudian diproses menggunakan metode pengambilan keputusan berbasis fuzzy [2]. Penelitian Rahmawati dkk. juga mengembangkan sistem monitoring kualitas air dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan metode Fuzzy Mamdani yang memanfaatkan sensor pH, TDS, dan



turbidity. Hasil penelitian menampilkan bahwa kombinasi ESP32 dan metode fuzzy mampu menghasilkan sistem pemantauan kualitas air secara otomatis berdasarkan kondisi parameter yang diperoleh dari sensor [3].

Selain itu, penelitian lain mengenai penerapan IoT dan metode fuzzy menunjukkan bahwa integrasi sensor dengan algoritma pengambilan keputusan dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam memberikan informasi yang lebih mudah dipahami pengguna. Sistem tidak hanya menampilkan data numerik hasil pengukuran, tetapi juga mampu mengklasifikasikan kondisi berdasarkan aturan tertentu sehingga dapat membantu proses pengambilan keputusan secara otomatis [4]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada proses akuisisi dan visualisasi data sensor secara real-time, sementara aspek kestabilan pembacaan sensor pada kondisi air mengalir serta interpretasi kualitas air secara otomatis belum dibahas secara mendalam. Beberapa penelitian juga belum menerapkan mekanisme pengolahan data untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sensor yang dapat memengaruhi hasil klasifikasi. Selain itu, penggunaan metode fuzzy pada penelitian terdahulu umumnya difokuskan pada proses klasifikasi kualitas air tanpa didukung rancangan fisik yang mampu menjaga kestabilan aliran saat proses pengukuran. Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat research gap berupa belum terintegrasinya sistem monitoring kualitas air yang mengombinasikan mekanisme stabilisasi pembacaan sensor, monitoring real-time berbasis IoT, dan klasifikasi kualitas air menggunakan metode Fuzzy Mamdani dalam satu sistem yang terintegrasi. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas air artesis berbasis ESP32 yang dilengkapi flow chamber dan metode moving average untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor serta menerapkan Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan klasifikasi kualitas air secara otomatis dan real-time..

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan alternatif penyelesaian terhadap permasalahan tersebut melalui integrasi sensor, mikrokontroler, dan jaringan internet. Teknologi IoT mendukung proses pengumpulan data, pengiriman informasi, serta pemantauan kondisi lingkungan dilakukan secara otomatis dan real-time. Sistem berbasis IoT telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang monitoring karena mampu melakukan akuisisi data secara berkelanjutan dan memberikan akses informasi dari jarak jauh [4]. Dalam implementasi sistem IoT, salah satu perangkat yang banyak dimanfaatkan adalah ESP32 karena memiliki kemampuan pemrosesan yang baik serta telah dilengkapi modul WiFi dan Bluetooth sehingga mampu mendukung komunikasi data secara nirkabel. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan sebagai pusat kendali sistem monitoring karena mampu mengintegrasikan berbagai sensor dan mengirimkan data hasil pengukuran menuju platform monitoring secara real-time [4].

Melalui penelitian ini, parameter kualitas air yang diamati berdasarkan derajat keasaman (*potential of hydrogen* atau pH), tingkat kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air. Ketiga parameter tersebut dipilih karena merupakan indikator utama yang digunakan dalam menentukan kondisi kualitas air. Penelitian terkait sistem pemantauan kualitas air yang memenuhi standar konsumsi dikembangkan melalui sensor pH, sensor kekeruhan, dan sensor suhu sebagai parameter masukan untuk menentukan kondisi kualitas air. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi beberapa parameter sensor dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kualitas air secara lebih komprehensif dibandingkan hanya menggunakan satu parameter pengukuran [2]. Dengan demikian, penelitian ini menerapkan proses *filtering* dengan metode *moving average* untuk meningkatkan kestabilan data sensor serta menggunakan *flow chamber* berbahan *thinwall* yang dirancang agar aliran air melewati sensor secara lebih terkontrol. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan pembacaan parameter pH, kekeruhan, dan suhu yang lebih konsisten selama proses monitoring berlangsung.

Untuk menginterpretasikan data hasil pembacaan sensor, penelitian ini menerapkan metode Fuzzy Mamdani sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan. Metode ini dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan fluktuasi data sensor yang umum terjadi pada proses monitoring kualitas air, terutama pada kondisi air mengalir. Berbeda dengan metode Fuzzy Sugeno yang menghasilkan keluaran berupa nilai matematis atau fungsi linear, metode Fuzzy Mamdani menghasilkan keluaran dalam bentuk linguistik seperti *Buruk*, *Sedang*, dan *Baik* sehingga lebih mudah dipahami oleh pengguna. Selain itu, metode Mamdani memiliki kemampuan merepresentasikan pengetahuan pakar melalui aturan IF-THEN yang fleksibel untuk menghubungkan parameter pH, suhu, dan tingkat kekeruhan dalam menentukan kualitas air. Berdasarkan penelitian terdahulu, metode Fuzzy Mamdani mampu mengidentifikasi kualitas air berdasarkan beberapa parameter masukan melalui proses fuzzifikasi, pembentukan aturan (*rule base*), inferensi, dan defuzzifikasi sehingga menghasilkan keputusan akhir mengenai kondisi air [2], [3]. Oleh karena itu, metode Fuzzy Mamdani dinilai sesuai untuk diterapkan pada sistem monitoring kualitas air artesis karena mampu mengubah data sensor yang bersifat tidak pasti menjadi informasi kualitas air yang lebih mudah diinterpretasikan secara real-time.

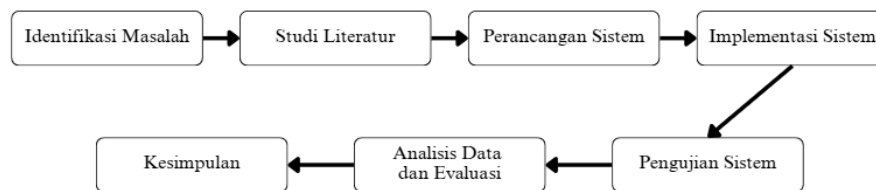
Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kualitas air artesis berbasis Internet of Things menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan integrasi metode Fuzzy Mamdani [5]. Sistem dirancang untuk membaca data dari sensor pH, turbidity, dan suhu secara kontinu, melakukan proses *filtering* terhadap data sensor, mengolah data melalui metode Fuzzy Mamdani, serta mengirimkan hasil monitoring ke platform ThingSpeak agar dapat dipantau secara real-time. Selain itu, sistem dilengkapi dengan LCD I2C 16×2 sebagai media informasi lokal untuk menampilkan hasil pengukuran dan kategori kualitas air secara bergantian.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT melalui integrasi sensor pH, turbidity, dan suhu dengan metode Fuzzy Mamdani. Penggunaan flow chamber dan metode moving average diterapkan untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor pada kondisi air mengalir, sedangkan metode Fuzzy Mamdani digunakan untuk mengubah data hasil pengukuran menjadi informasi kualitas air yang lebih mudah dipahami. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring secara real-time melalui platform ThingSpeak sehingga dapat membantu proses pemantauan kualitas air secara lebih efektif dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Tahapan Penelitian

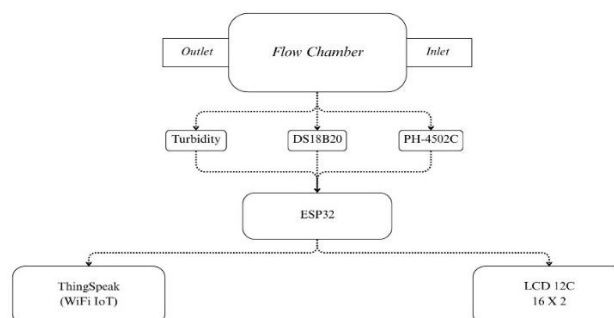
Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis untuk merancang dan mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan terkait pemantauan kualitas air serta studi literatur mengenai parameter kualitas air, sensor pH, sensor turbidity, sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP32, platform ThingSpeak, dan metode Fuzzy Mamdani. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem yang meliputi perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian dilanjutkan dengan implementasi sistem untuk mengintegrasikan sensor, ESP32, LCD I2C, koneksi internet, serta metode Fuzzy Mamdani. Sistem yang telah dibangun kemudian diuji menggunakan sampel air artesis yang dialirkan melalui flow chamber selama satu jam dengan interval pengambilan data setiap 20 detik. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor, kinerja sistem monitoring, serta hasil klasifikasi kualitas air yang dihasilkan. Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur yang berkaitan dengan monitoring kualitas air, sensor, ESP32, dan metode Fuzzy Mamdani. Selanjutnya dilakukan perancangan dan implementasi sistem yang terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem yang telah dibangun kemudian diuji menggunakan air artesis selama satu jam dengan interval pengambilan data setiap 20 detik. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor, kinerja sistem monitoring, serta hasil klasifikasi kualitas air yang dihasilkan.

Sistem yang dikembangkan menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang terhubung dengan sensor pH-4502C, sensor turbidity, dan sensor suhu DS18B20 sebagai masukan sistem. Hasil monitoring dari ketiga sensor diproses melalui metode Fuzzy Mamdani untuk mengklasifikasikan kualitas air, kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 dan dikirimkan melalui jaringan WiFi menuju platform ThingSpeak sebagai media penyimpanan dan pemantauan data secara *real-time*. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor pada air yang mengalir, digunakan *flow chamber* berbahan *thinwall* yang dilengkapi saluran masuk (*inlet*) dan saluran keluar (*outlet*). Hubungan antar komponen penyusun sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



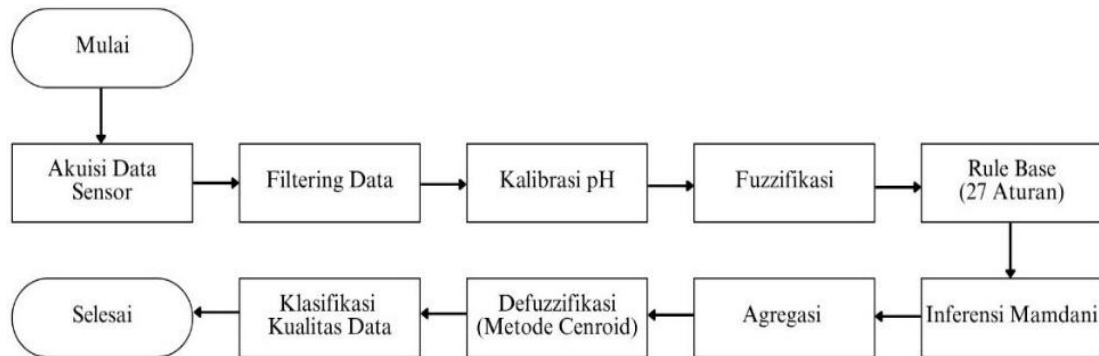
Gambar 2. Diagram blok sistem pemantauan kualitas air artesis berbasis IoT.

Berdasarkan Gambar 2, sistem terdiri atas sensor pH-4502C, sensor turbidity, dan sensor suhu DS18B20 yang berfungsi memperoleh data kualitas air secara *real-time*. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32 melalui tahap filtering menggunakan metode moving average dan selanjutnya diolah menggunakan metode Fuzzy Mamdani untuk menentukan kategori kualitas air. Hasil pengolahan ditampilkan pada LCD I2C 16×2 serta dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui jaringan WiFi untuk keperluan monitoring dan penyimpanan data secara *real-time*. Sensor ditempatkan pada flow chamber berbahan *thinwall* untuk membantu menjaga kestabilan pembacaan pada kondisi air mengalir.

2.2 Metode Sistem dan Pengolahan Data

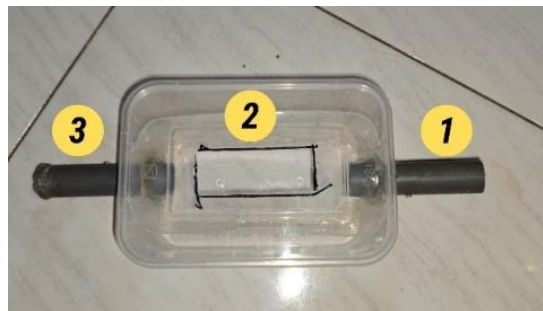
Penelitian ini menggunakan metode yang meliputi proses akuisisi data sensor, *filtering* data, pengolahan menggunakan metode Fuzzy Mamdani, serta pengiriman hasil monitoring menuju platform ThingSpeak sebagai media pemantauan secara *real-time*. Integrasi antara sistem akuisisi data sensor, komunikasi IoT, dan metode kecerdasan komputasi telah

banyak diterapkan untuk menghasilkan sistem monitoring yang dirancang agar dapat menghasilkan informasi secara otomatis dan berkelanjutan [6]. Diagram alir proses sistem ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart Fuzzy Mamdani

Proses diawali dengan akuisisi data menggunakan tiga sensor yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32, yaitu sensor pH-4502C dimanfaatkan untuk mengetahui tingkat keasaman air, sedangkan tingkat kekeruhan diukur menggunakan sensor turbidity, serta sensor suhu DS18B20 untuk mengukur temperatur air. Kombinasi ketiga parameter tersebut telah banyak digunakan sebagai indikator dalam penentuan kualitas air karena mampu merepresentasikan kondisi fisik maupun kimia air [3], [6]. Untuk memperoleh pembacaan yang lebih stabil pada kondisi air mengalir, seluruh sensor ditempatkan di dalam *flow chamber* berbahan *thinwall* yang dilengkapi saluran masuk (*inlet*) dan saluran keluar (*outlet*). Penempatan sensor pada ruang utama *flow chamber* bertujuan mengurangi pengaruh turbulensi aliran sehingga fluktuasi pembacaan, khususnya pada sensor pH dan turbidity, dapat diminimalkan. Rancangan *Flow Chamber* ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain *Flow chamber* Sistem Monitoring Kualitas Air

Data hasil pembacaan sensor selanjutnya mengalami proses *filtering* untuk meningkatkan kestabilan data sebelum dilakukan pengolahan. Pada setiap siklus pembacaan, sensor melakukan pengambilan 179 data yang kemudian dihitung nilai rata-ratanya menggunakan metode *moving average*. Metode ini banyak digunakan pada sistem monitoring berbasis sensor karena mampu mereduksi pengaruh *noise* dan menghasilkan data yang lebih representatif sebelum dilakukan proses klasifikasi [7]. Persamaan rata-rata ditunjukkan pada Persamaan (1)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

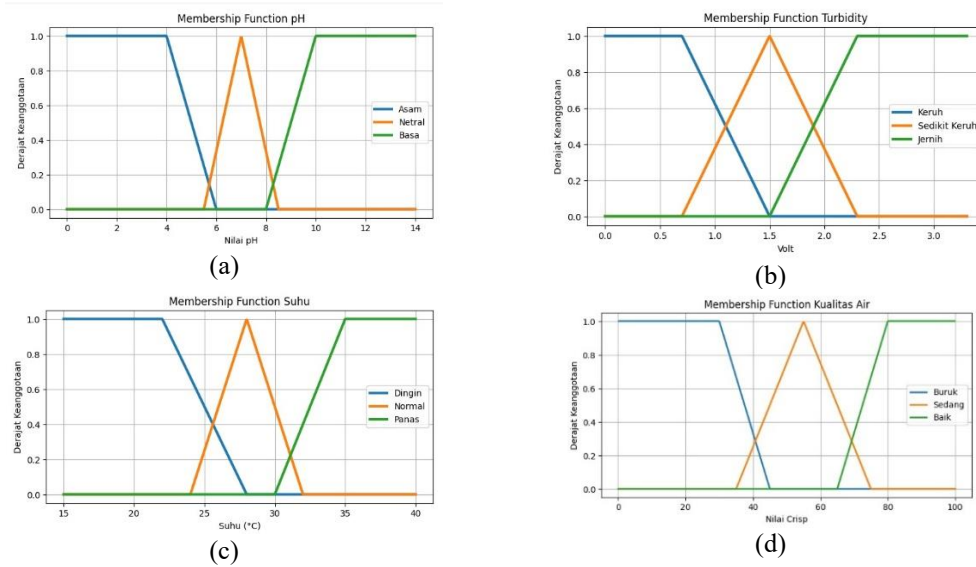
Keterangan : $\bar{x}$ = nilai rata-rata ; x_i = data sensor ke- i ; n = jumlah sampel. Nilai hasil filtering inilah yang selanjutnya digunakan sebagai input metode Fuzzy Mamdani.

Selain proses *filtering*, sensor pH juga dikalibrasi menggunakan larutan buffer pH 4 dan pH 6 untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran. Hubungan antara tegangan keluaran sensor dengan nilai pH dinyatakan menggunakan persamaan linear sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2), dengan parameter *slope* dan *offset* yang diperoleh dari hasil kalibrasi.

$$pH = mV + b \quad (2)$$

Keterangan : V = tegangan keluaran sensor ; m = nilai slope hasil kalibrasi ; b = nilai offset kalibrasi

Data hasil *filtering* kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Tahap pertama adalah proses fuzzifikasi, yaitu mengubah data numerik (*crisp value*) menjadi derajat keanggotaan (*membership degree*) pada setiap himpunan fuzzy [8]. Penelitian ini menggunakan tiga variabel masukan, yaitu pH dengan himpunan Asam, Netral, dan Basa; turbidity dengan himpunan Keruh, Sedikit Keruh, dan Jernih; serta suhu dengan himpunan Dingin, Normal, dan Panas. Adapun variabel keluaran berupa kualitas air yang terdiri atas kategori Buruk, Sedang, dan Baik. Fungsi keanggotaan masing-masing variabel disesuaikan dengan karakteristik parameter dan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Membership function

Setelah proses fuzzifikasi, data hasil pembacaan sensor diproses menggunakan *rule base* sebagai dasar pengambilan keputusan pada metode Fuzzy Mamdani. *Rule base* merupakan sekumpulan aturan berbentuk IF–THEN yang menghubungkan variabel input dengan variabel output. Pendekatan aturan fuzzy berbasis IF–THEN telah banyak digunakan dalam sistem pendukung keputusan karena mampu merepresentasikan kondisi kompleks yang sulit ditentukan menggunakan metode ambang batas sederhana [2], [9]. Berikut beberapa contoh aturanyang digunakan dalam proses penelitian :

R1 : IF pH = Asam AND Turbidity = Keruh AND Suhu = Panas THEN Kualitas Air = Buruk

R2 : IF pH = Netral AND Turbidity = Jernih AND Suhu = Normal THEN Kualitas Air = Baik

R3 : IF pH = Basa AND Turbidity = Sedikit Keruh AND Suhu = Normal THEN Kualitas Air = Sedang

Seluruh aturan yang telah disusun digunakan pada proses inferensi untuk menentukan kategori kualitas air berdasarkan hasil pembacaan sensor. Pada tahap inferensi digunakan operator Minimum (MIN) untuk menentukan nilai *firing strength* setiap aturan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\alpha_i = \min(\mu_{pH}, \mu_{Turbidity}, \mu_{Suhu}) \quad (3)$$

Selanjutnya seluruh hasil inferensi digabung menggunakan operator Maximum (MAX) sehingga diperoleh satu himpunan fuzzy keluaran sesuai Persamaan (4).

$$\mu(z) = \max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (4)$$

Tahap terakhir merupakan proses defuzzifikasi menggunakan metode Centroid untuk mengubah himpunan fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp value*). Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan nilai keluaran berdasarkan titik pusat distribusi fungsi keanggotaan sehingga banyak digunakan pada sistem berbasis Fuzzy Mamdani [9]. Persamaan centroid ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$z^* = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (5)$$

Nilai *crisp* yang diperoleh kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kategori kualitas air, yaitu Baik, Sedang, dan Buruk. Hasil akhir pengolahan data ditampilkan melalui dua media, yaitu LCD I2C 16×2 sebagai tampilan lokal dan platform ThingSpeak sebagai media penyimpanan serta visualisasi data secara *real-time*. LCD menampilkan informasi hasil pembacaan sensor dan kategori kualitas air secara bergantian, sedangkan ThingSpeak menyimpan seluruh data hasil pengukuran sehingga pengguna dapat memantau perubahan kualitas air serta menganalisis data historis secara berkala [10].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Implementasi Sistem

Melalui proses implementasi sistem dalam penelitian ini berhasil merealisasikan sistem untuk memantau kualitas air artesis berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui mikrokontroler ESP32 dengan metode Fuzzy Mamdani sebagai metode pengambilan keputusan. Sistem dirancang untuk melakukan pemantauan kualitas air secara *real-time* berdasarkan tiga parameter utama, yaitu nilai pH, tingkat kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air. Secara umum, sistem terdiri atas perangkat keras (*hardware*) sebagai media akuisisi data dan perangkat lunak (*software*) sebagai pengolah data hasil pembacaan

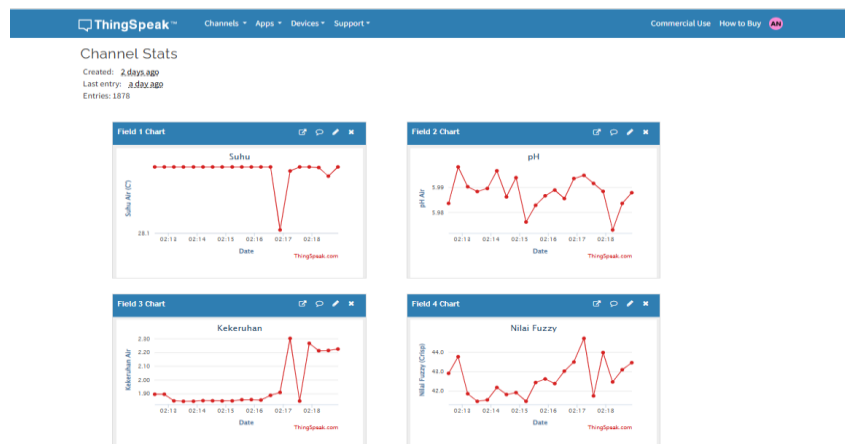
sensor. Data yang diperoleh dari sensor terlebih dahulu melalui proses *filtering* untuk mengurangi fluktuasi pembacaan, kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani sehingga menghasilkan nilai kualitas air. Hasil pengolahan selanjutnya ditampilkan pada LCD I2C sebagai media monitoring lokal serta dikirimkan menuju platform ThingSpeak melalui jaringan WiFi agar dapat dipantau secara *real-time*.

Perangkat keras sistem terdiri atas ESP32, sensor pH-4502C, sensor turbidity, sensor suhu DS18B20, LCD I2C 16×2, dan flow chamber. ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali untuk membaca data sensor, melakukan proses Fuzzy Mamdani, menampilkan hasil pada LCD, serta mengirimkan data ke ThingSpeak melalui jaringan WiFi. Pemanfaatan ESP32 sebagai pengendali utama pada sistem monitoring berbasis IoT banyak digunakan karena telah dilengkapi modul WiFi terintegrasi, memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, serta mendukung komunikasi dengan berbagai sensor secara bersamaan [4], [9]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa ESP32 mampu digunakan untuk membangun sistem monitoring kualitas air dengan pengiriman data secara *real-time* melalui jaringan internet [11]. Pengukuran tingkat keasaman dan kebasaan air dilakukan dengan menggunakan sensor pH, untuk mengukur tingkat kekeruhan berdasarkan perubahan intensitas cahaya digunakan sensor *turbidity*, sedangkan sensor DS18B20 berperan dalam proses pengukuran suhu air. Ketiga parameter tersebut dipilih karena telah banyak digunakan sebagai indikator utama dalam proses klasifikasi kualitas air melalui metode Fuzzy Mamdani [2]. Penerapan perangkat keras direalisasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perangkat keras yang telah dibuat

Pengembangan perangkat lunak sistem dilakukan dengan menggunakan ArduinoIDE berbasis bahasa pemrograman C++ pada mikrokontroler ESP32. Program yang dibuat meliputi proses pembacaan sensor, *filtering* data, proses fuzzifikasi, inferensi Mamdani, agregasi menggunakan operator MAX, defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*, serta pengiriman data menuju platform ThingSpeak. Pembacaan sensor dilakukan secara periodik untuk memperoleh nilai pH, tegangan keluaran sensor *turbidity*, dan suhu air. Nilai hasil pembacaan kemudian diproses menggunakan metode *filtering* sebelum digunakan sebagai masukan pada sistem inferensi Fuzzy Mamdani. Proses ini dilakukan untuk mengurangi pengaruh *noise*, fluktuasi aliran air, maupun gangguan lingkungan yang dapat memengaruhi kestabilan hasil pembacaan sensor [12]. Selanjutnya data diproses melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi menggunakan operator MIN, agregasi menggunakan operator MAX, dan defuzzifikasi menggunakan metode *centroid* sehingga diperoleh nilai *crisp* sebagai hasil penentuan kualitas air. Nilai tersebut kemudian disajikan melalui LCD dan diteruskan menuju platform ThingSpeak sehingga dapat memonitoring kualitas air secara langsung [10]. Tampilan dashboard ThingSpeak yang menampilkan data hasil monitoring ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Tampilan dashboard ThingSpeak

Berdasarkan Gambar 7, dashboard ThingSpeak menampilkan visualisasi data pH, suhu, kekeruhan, dan nilai fuzzy yang diperoleh dari sistem monitoring secara *real-time*. Data yang diterima dari ESP32 disimpan secara otomatis dan disajikan dalam bentuk grafik sehingga memudahkan proses pemantauan serta analisis perubahan kualitas air selama pengujian berlangsung. Nilai fuzzy yang ditampilkan merupakan hasil pengolahan metode Fuzzy Mamdani yang digunakan sebagai dasar penentuan kategori kualitas air.



3.2 Hasil Pengujian Sensor

Proses pengujian sistem bertujuan untuk mengukur tingkat keberhasilan sistem monitoring dalam melakukan akuisisi data kualitas air artesis secara *real-time* pada kondisi air mengalir. Parameter yang diamati meliputi nilai pH, tingkat kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air. Seluruh perangkat sensor yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32 yang melakukan pembacaan data secara periodik, kemudian hasil pengukuran dikirimkan menuju platform ThingSpeak melalui jaringan WiFi. Pengujian sistem berlangsung selama satu jam dengan interval pengiriman data setiap 20 detik sehingga diperoleh sekitar **180 data** hasil pengukuran. Seluruh data kemudian diunduh dari platform ThingSpeak dalam format CSV guna untuk dianalisis melalui analisis statistik deskriptif yang mencakup nilai terendah, tertinggi, rata-rata (*mean*), dan standar deviasi. Pendekatan statistik deskriptif digunakan untuk memberikan gambaran karakteristik data hasil pengukuran selama proses monitoring berlangsung [13].

Tabel 1. Hasil Statistik Pengujian Sensor Selama Monitoring

Sensor	MIN	MAX	Rata-rata	Standar Deviasi	Kategori Dominan
pH	6,03	6,18	6,10	0,04	Netral
Turbidity (V)	2,56	2,67	2,61	0,03	Jernih
Suhu (°C)	28,4	29,2	28,8	0,20	Normal

Berdasarkan Tabel 1, dapat diketahui hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor mampu melakukan pembacaan data secara kontinu selama proses monitoring berlangsung. Sensor pH menghasilkan nilai pada rentang 6,03–6,18 dengan nilai rata-rata 6,10 dan standar deviasi 0,04. Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa variasi data hasil pengukuran relatif kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa metode moving average yang diterapkan pada sistem berhasil mereduksi fluktuasi pembacaan sensor akibat noise dan perubahan aliran air sehingga menghasilkan data yang lebih stabil. Berdasarkan fungsi keanggotaan Fuzzy Mamdani, nilai pH selama pengujian berada pada kategori Netral. Sensor *turbidity* menghasilkan tegangan keluaran pada rentang 2,56–2,67 V dengan nilai rata-rata 2,61 V dan standar deviasi 0,03 V. Variasi tegangan yang relatif kecil menunjukkan bahwa kondisi air selama proses pengujian cenderung stabil dan berada pada kategori Jernih. Fluktuasi kecil yang masih muncul diperkirakan disebabkan oleh adanya gelembung udara maupun perubahan posisi partikel di dalam *flow chamber*. Hal tersebut sesuai dengan karakteristik sensor *turbidity* yang bekerja berdasarkan perubahan intensitas cahaya sehingga gangguan optik dapat memengaruhi hasil pembacaan [12]. Pengujian sensor suhu DS18B20 menunjukkan bahwa suhu air berada pada rentang 28,4–29,2 °C dengan nilai rata-rata 28,8 °C dan standar deviasi 0,20 °C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa temperatur air artesis selama proses monitoring relatif stabil dan berada pada kategori Normal berdasarkan fungsi keanggotaan Fuzzy Mamdani. Stabilitasnya hasil pembacaan sensor suhu menunjukkan bahwa sensor DS18B20 memiliki performa yang baik untuk digunakan pada sistem monitoring kualitas air berbasis IoT. [14]

Secara keseluruhan, nilai standar deviasi seluruh parameter berada pada kisaran yang rendah, yaitu 0,04 untuk pH, 0,03 V untuk *turbidity*, dan 0,20 °C untuk suhu. Rendahnya nilai standar deviasi tersebut menunjukkan bahwa data hasil pengukuran memiliki tingkat penyebaran yang kecil terhadap nilai rata-ratanya. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan metode moving average pada sistem mampu meningkatkan kestabilan pembacaan sensor dengan mengurangi pengaruh noise dan fluktuasi sesaat yang muncul selama proses monitoring pada kondisi air mengalir. Dengan demikian, data yang dihasilkan menjadi lebih representatif dan layak digunakan sebagai masukan pada proses klasifikasi kualitas air menggunakan metode Fuzzy Mamdani.

3.3 Implementasi Metode Fuzzy Mamdani

Metode Fuzzy Mamdani diimplementasikan pada sistem sebagai metode penentuan keputusan dalam mengklasifikasikan kualitas air artesis berdasarkan tiga parameter masukan, yaitu nilai pH, tingkat kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air. Penerapan metode ini bertujuan agar sistem tidak hanya menampilkan hasil pembacaan sensor, tetapi juga mampu menginterpretasikan kondisi kualitas air secara otomatis. Seluruh proses pengolahan data dilakukan di dalam mikrokontroler ESP32 setelah data sensor melewati tahap *filtering*, sehingga nilai yang digunakan sebagai masukan merupakan data yang lebih stabil. Implementasi metode Fuzzy Mamdani pada penelitian ini mengikuti tahapan yang telah dijelaskan pada metodologi penelitian, yaitu proses fuzzifikasi, inferensi, agregasi, dan defuzzifikasi [15].

Pada tahap fuzzifikasi, data hasil pembacaan sensor diubah menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy sesuai fungsi keanggotaan yang telah dirancang. Variabel masukan terdiri atas pH dengan kategori Asam, Netral, dan Basa; *turbidity* dengan kategori Keruh, Sedikit Keruh, dan Jernih; serta suhu dengan kategori Dingin, Normal, dan Panas. Hasil fuzzifikasi kemudian diproses pada tahap inferensi menggunakan 27 aturan (*rule base*) berbentuk IF–THEN yang menghubungkan kombinasi ketiga variabel masukan dengan kategori kualitas air sebagai variabel keluaran [16]. Nilai keluaran dari setiap aturan selanjutnya digabung melalui proses agregasi sehingga diperoleh satu himpunan fuzzy keluaran yang merepresentasikan kondisi kualitas air [17].

Tahap akhir implementasi dilakukan melalui proses defuzzifikasi dengan metode Centroid untuk memperoleh nilai *crisp* sebagai keluaran sistem. Nilai *crisp* yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kategori kualitas air, kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 dan dikirimkan ke platform ThingSpeak sebagai informasi hasil monitoring secara *real-time*. Interpretasi nilai *crisp* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Interpretasi Nilai Crisp Hasil Defuzzifikasi

Nilai Crisp	Kategori
< 40	Buruk
40 – <70	Sedang
≥ 70	Baik

Berdasarkan implementasi tersebut, sistem mampu mengolah data hasil pembacaan sensor secara otomatis menjadi informasi kualitas air yang lebih mudah dipahami pengguna. Proses klasifikasi tidak lagi bergantung pada interpretasi masing-masing parameter secara terpisah, melainkan mempertimbangkan kombinasi nilai pH, tingkat kekeruhan, dan suhu melalui mekanisme inferensi Fuzzy Mamdani. Dengan demikian, hasil keluaran sistem berupa kategori Baik, Sedang, atau Buruk dapat digunakan sebagai dasar dalam melakukan monitoring dan analisis kualitas air artesis secara *real-time*.

3.4 Hasil Monitoring dan Analisis Kualitas Air

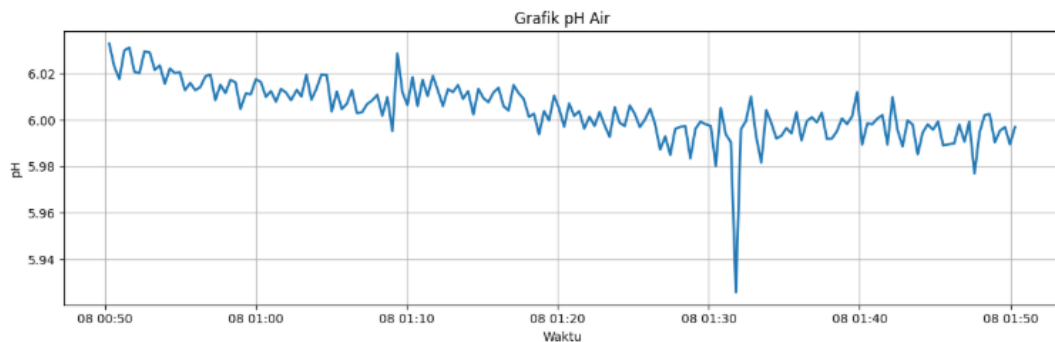
Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan alat dalam memonitor kualitas air artesis secara **real-time** menggunakan parameter pH, suhu, dan tingkat kekeruhan (turbidity). Data hasil pembacaan sensor dikirimkan ke platform ThingSpeak setiap 20 detik dan direkam selama proses pengujian. Berdasarkan keseluruhan data yang diperoleh, analisis penelitian difokuskan pada dataset hasil monitoring selama **1 jam**, yaitu pukul **00.50–01.50 WIB**, karena pada rentang waktu tersebut sistem telah menggunakan konfigurasi perangkat lunak yang telah final serta kondisi pembacaan sensor relatif stabil.

3.4.1 Hasil Monitoring Sensor

Selama pengujian berlangsung, sistem berhasil melakukan pembacaan ketiga parameter kualitas air secara kontinu. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa sensor mampu mengirimkan informasi kondisi air ke platform ThingSpeak tanpa mengalami kehilangan data (data loss). Hasil monitoring kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis terhadap perubahan masing-masing parameter.

a. Hasil Monitoring pH (PH-4052C)

Untuk mengetahui perubahan tingkat keasaman air selama proses monitoring, data hasil pembacaan sensor pH divisualisasikan dalam bentuk grafik terhadap waktu pengamatan. Grafik ini digunakan untuk mengamati kestabilan nilai pH serta melihat kecenderungan perubahan pH air artesis selama satu jam pengujian.

**Gambar 8.** Grafik hasil monitoring nilai pH air artesis selama 1 jam.

Berdasarkan hasil monitoring, nilai pH berada pada rentang 6,03–6,18 dengan rata-rata 6,10 dan menunjukkan kondisi yang relatif stabil selama pengujian. Untuk mengetahui kesesuaian hasil pembacaan sensor pH-4502C, dilakukan pengukuran pembandingan menggunakan pH meter digital pada beberapa waktu selama proses pengujian. Pengukuran dilakukan sebanyak empat kali dengan interval sekitar 10 menit mulai pukul 01.20 hingga 02.00. Hasil perbandingan ditampilkan pada Tabel 3.

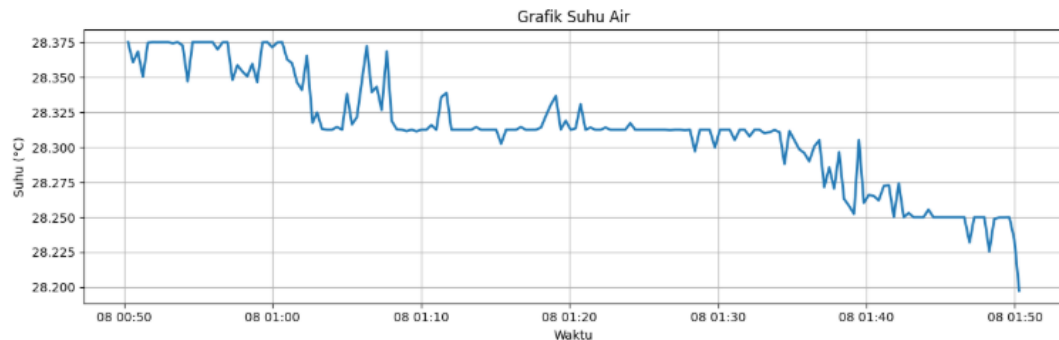
Tabel 3. Perbandingan Hasil Pembacaan Sensor pH dan pH Meter

Waktu	Sensor pH	pH Meter	Selisih
01.20	6,08	6,07	0,01
01.30	6,12	6,13	0,01
01.40	6,09	6,10	0,01
02.00	6,10	6,10	0,00

Berdasarkan Tabel 3, hasil pembacaan sensor pH-4502C memiliki selisih yang sangat kecil terhadap hasil pengukuran menggunakan pH meter digital, yaitu berkisar antara 0,00 hingga 0,01 pH. Hasil yang diperoleh membuktikan bahwa sensor yang digunakan mempunyai tingkat kesesuaian yang baik terhadap alat ukur pembandingan sehingga layak digunakan sebagai sensor pemantauan kualitas air secara *real-time*. Perbedaan nilai yang masih muncul diperkirakan dipengaruhi oleh karakteristik sensor analog, proses konversi sinyal, serta kondisi aliran air selama proses pengukuran.

b. Hasil Monitoring Suhu (DS18B20)

Monitoring suhu air dilakukan menggunakan sensor DS18B20 yang berfungsi mengukur temperatur air secara real-time. Grafik hasil pengukuran digunakan untuk melihat pola perubahan suhu selama periode pengujian serta mengevaluasi kestabilan sensor dalam melakukan pembacaan pada kondisi air mengalir.

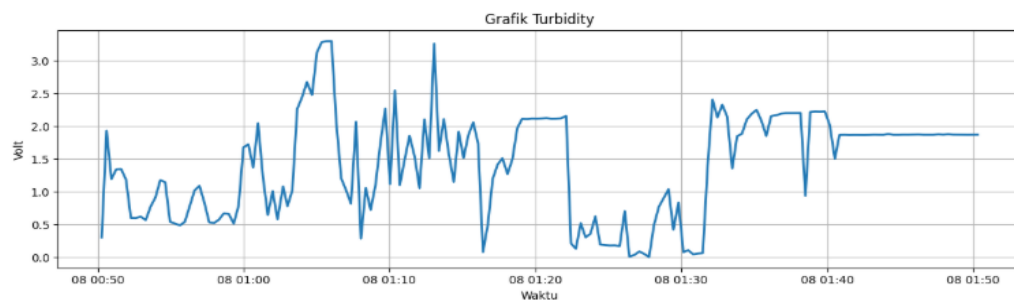


Gambar 9. Grafik hasil Monitoring suhu air artesis selama 1 jam.

Hasil monitoring menunjukkan bahwa Suhu air berada pada rentang 28–29°C dan tergolong normal berdasarkan fungsi keanggotaan yang digunakan. Stabilitasnya suhu air menunjukkan bahwa kondisi lingkungan selama pengujian tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan temperatur air artesis.

c. Hasil Monitoring Kekeruhan (Turbidity)

Monitoring tingkat kekeruhan dilakukan menggunakan sensor turbidity yang menghasilkan keluaran berupa tegangan. Data hasil pembacaan divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan perubahan tingkat kekeruhan air selama proses pengujian serta mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor pada kondisi air mengalir.

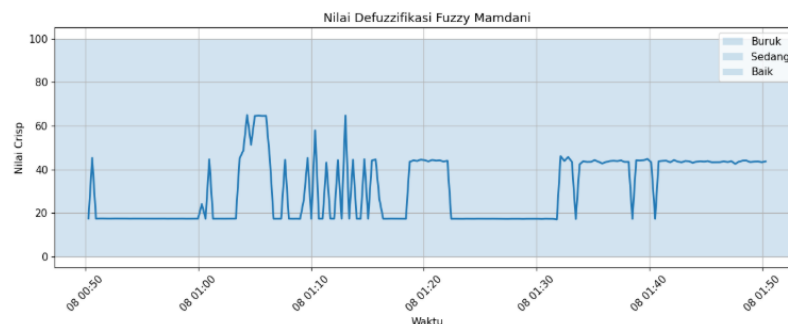


Gambar 10. Grafik hasil monitoring tegangan sensor turbidity selama 1 jam.

Nilai Tegangan keluaran sensor turbidity berada pada kategori jernih meskipun masih terdapat fluktuasi kecil akibat gelembung udara dan perubahan aliran air.

3.4.2 Hasil Klasifikasi Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani

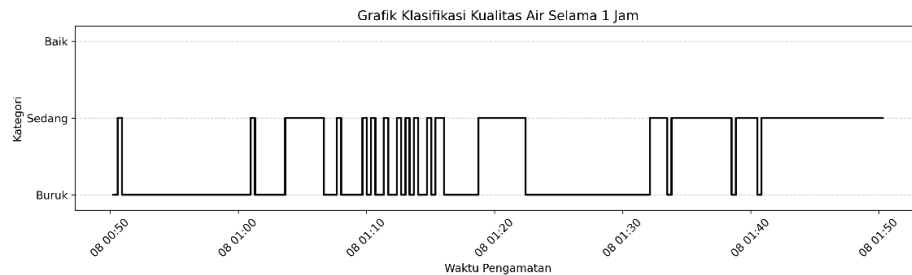
Setelah data sensor diperoleh, sistem melakukan proses fuzzifikasi, inferensi menggunakan 27 aturan *fuzzy*, serta defuzzifikasi dengan metode *centroid* untuk menghasilkan nilai *crisp* sebagai dasar penentuan kualitas air. Hasil proses defuzzifikasi menghasilkan nilai *crisp* dengan rentang nilai 0-100 yang selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengklasifikasikan kualitas air menjadi tiga kategori, yaitu Buruk, Sedang, dan Baik sesuai dengan aturan fuzzy yang diterapkan.



Gambar 11. Grafik hasil defuzzifikasi kualitas air menggunakan metode Fuzzy Mamdani.

Berdasarkan hasil pengolahan data selama satu jam pengujian, diperoleh 179 data hasil defuzzifikasi dengan nilai *crisp* minimum 17,03, maksimum 64,94, dan rata-rata 30,66. Berdasarkan rentang interpretasi yang digunakan, nilai rata-rata tersebut termasuk dalam kategori Buruk. Selama proses monitoring, hasil klasifikasi didominasi oleh kategori Buruk

dan Sedang, sedangkan kategori Baik tidak muncul. Perubahan nilai *crisp* dipengaruhi oleh hasil pembacaan pH, tingkat kekeruhan, dan suhu, di mana nilai pH yang masih berada di bawah batas netral menyebabkan sebagian besar hasil inferensi Fuzzy Mamdani berada pada kategori Buruk. Nilai *crisp* selanjutnya diklasifikasikan secara otomatis menjadi kategori Buruk, Sedang, atau Baik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik klasifikasi kualitas air selama proses monitoring.

Berdasarkan hasil klasifikasi, sistem menghasilkan dua kategori kualitas air selama proses monitoring, yaitu Buruk dan Sedang, sedangkan kategori Baik tidak muncul. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai suhu dan tingkat kekeruhan relatif stabil, kondisi pH yang cenderung berada di bawah batas netral menyebabkan sebagian besar hasil inferensi Fuzzy Mamdani berada pada kategori Buruk. Pada beberapa waktu pengamatan terjadi perubahan kategori menjadi Sedang, yang menunjukkan adanya perbaikan kondisi parameter masukan, terutama ketika nilai pH meningkat mendekati kondisi netral. Secara keseluruhan, grafik klasifikasi memperlihatkan bahwa sistem mampu melakukan perubahan status kualitas air secara otomatis mengikuti perubahan nilai sensor yang diterima secara *real-time* [18].

Tabel 4. Hasil Klasifikasi Kualitas Air

Kategori	Kode	Jumlah Data	Persentase
Buruk	1	105	58,66%
Sedang	2	75	41,34%
Baik	3	0	0,00%
Total	-	180	100%

Berdasarkan Tabel 4, kategori Buruk merupakan hasil klasifikasi yang paling dominan dengan persentase 58,66%, sedangkan kategori Sedang sebesar 41,34% dan kategori Baik tidak muncul. Kondisi ini disebabkan oleh nilai pH yang berada pada rentang 6,03–6,18 dengan rata-rata 6,10, sehingga lebih banyak termasuk kategori asam dibandingkan netral. Meskipun suhu dan tingkat kekeruhan berada pada kondisi yang stabil, kombinasi parameter dalam rule base menyebabkan hasil inferensi Fuzzy Mamdani lebih sering menghasilkan kategori Buruk dan Sedang. Dengan demikian, tidak munculnya kategori Baik lebih dipengaruhi oleh kondisi aktual pH selama pengujian dibandingkan oleh rule base yang digunakan.

3.5 Pembahasan

Berdasarkan hasil implementasi serta pengujian yang telah dilaksanakan, sistem monitoring kualitas air artesis berbasis Internet of Things (IoT) dengan ESP32 dan metode Fuzzy Mamdani berhasil bekerja sesuai dengan rancangan. Seluruh sensor, yaitu sensor pH PH-4502C, sensor turbidity, dan sensor suhu DS18B20, mampu melakukan pembacaan data secara kontinu selama satu jam pengujian serta mengirimkan hasil monitoring ke platform ThingSpeak secara *real-time*. Dari hasil pengujian mengidentifikasi bahwa sensor pH menghasilkan nilai rata-rata sebesar 6,10, sensor turbidity memiliki rata-rata tegangan 2,61 V, sedangkan sensor suhu menunjukkan rata-rata 28,8 °C. Ketiga parameter tersebut relatif stabil selama proses monitoring, meskipun masih ditemukan fluktuasi kecil terutama pada sensor turbidity yang dipengaruhi oleh gelembung udara dan perubahan aliran air di dalam *flow chamber*. Penggunaan metode *moving average* pada proses pengolahan data terbukti mampu mengurangi fluktuasi pembacaan sehingga data yang digunakan sebagai masukan metode Fuzzy Mamdani menjadi lebih stabil [13]. Hasil pengolahan menggunakan metode Fuzzy Mamdani menunjukkan bahwa sistem mampu mengolah ketiga parameter sensor menjadi informasi kualitas air secara otomatis. Selama satu jam pengujian diperoleh nilai *crisp* berkisar antara 17,03 hingga 64,94 dengan nilai rata-rata 30,66. Berdasarkan rentang interpretasi yang digunakan, hasil tersebut didominasi oleh kategori Buruk dan Sedang, dengan persentase masing-masing sebesar 58,66% dan 41,34%, sedangkan kategori Baik tidak muncul selama proses monitoring. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy Mamdani sangat dipengaruhi oleh kombinasi seluruh parameter masukan. Meskipun suhu dan tingkat kekeruhan relatif stabil, nilai pH yang masih berada di bawah batas netral menyebabkan sebagian besar aturan (*rule base*) menghasilkan keluaran pada kategori “Buruk”. Dengan demikian, sistem tidak hanya menampilkan nilai hasil pengukuran sensor, tetapi juga mampu memberikan interpretasi kualitas air secara otomatis berdasarkan aturan yang telah dirancang [19].

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya. Penelitian oleh Latipah dan Alamsyah menerapkan metode Fuzzy Mamdani dalam proses mengidentifikasi kondisi air yang mengacu pada parameter pH, suhu, dan kekeruhan, namun sistem yang dikembangkan belum mengintegrasikan monitoring berbasis Internet of Things secara



real-time [2]. Sementara itu, beberapa penelitian lain telah memanfaatkan ESP32 dan platform ThingSpeak untuk monitoring kualitas air, tetapi umumnya hanya menampilkan hasil pembacaan sensor tanpa melakukan klasifikasi otomatis menggunakan metode kecerdasan komputasi. Pada penelitian ini, seluruh proses mulai dari akuisisi data sensor, *filtering*, klasifikasi menggunakan metode Fuzzy Mamdani, hingga penyimpanan dan visualisasi data pada platform ThingSpeak telah diintegrasikan dalam satu sistem. Selain itu, penggunaan flow chamber sebagai media pengukuran membantu menjaga kestabilan aliran air sehingga pembacaan sensor menjadi lebih konsisten selama proses monitoring. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mampu menghasilkan sistem monitoring *real-time*, tetapi juga mampu memberikan informasi kualitas air secara otomatis berdasarkan hasil pengolahan metode Fuzzy Mamdani[20].

Sistem memiliki kelebihan berupa kemampuan monitoring dan klasifikasi kualitas air secara otomatis serta *real-time*. Namun, penelitian ini masih terbatas pada parameter pH, suhu, dan turbidity, serta belum mengevaluasi performa sensor dalam jangka panjang. Sebagai upaya untuk meningkatkan akurasi hasil monitoring, Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan parameter lain seperti TDS atau DO serta melakukan optimasi fungsi keanggotaan dan rule base untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Selain itu, integrasi dengan platform IoT yang mendukung notifikasi otomatis dan penyimpanan data jangka panjang diharapkan dapat meningkatkan fungsi sistem sebagai sistem monitoring kualitas air dengan performa yang lebih baik dan mudah diterapkan pada skala yang lebih luas.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan metode Fuzzy Mamdani untuk mengolah parameter pH, suhu, dan tingkat kekeruhan (turbidity) secara *real-time*. Sistem yang dirancang mampu melakukan akuisisi data, menampilkan informasi pada LCD, serta mengirimkan data ke platform ThingSpeak untuk kebutuhan monitoring jarak jauh. Hasil pengujian selama satu jam menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja secara stabil pada kondisi air mengalir dengan nilai standar deviasi masing-masing sebesar 0,04 untuk pH, 0,03 V untuk turbidity, dan 0,20 °C untuk suhu, yang menunjukkan bahwa penerapan metode moving average dan flow chamber mampu membantu mengurangi fluktuasi pembacaan sensor. Metode Fuzzy Mamdani yang diterapkan melalui 27 aturan fuzzy berhasil mengklasifikasikan kualitas air secara otomatis berdasarkan kombinasi ketiga parameter dan menghasilkan nilai crisp rata-rata sebesar 30,66 yang termasuk dalam kategori Buruk. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi flow chamber, *filtering* data menggunakan moving average, dan metode Fuzzy Mamdani dalam satu sistem monitoring kualitas air berbasis IoT sehingga mampu menghasilkan informasi kualitas air yang lebih mudah diinterpretasikan dibandingkan hanya menampilkan nilai sensor. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan dalam durasi yang relatif singkat dan belum mengevaluasi pengaruh penggunaan sensor dalam jangka panjang, seperti perubahan akurasi akibat degradasi sensor. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat menambahkan parameter kualitas air lainnya serta melakukan pengujian dengan periode monitoring yang lebih panjang untuk meningkatkan keandalan dan akurasi sistem.

REFERENCES

- [1] M. A. Iqlima, A. R. Putri, F. Hanum, and A. A. Dwi, "Analisis Kualitas Air pada Sumber Mata Air di Kelurahan Kandi Kecamatan Gunungpati Kota Semarang," pp. 784–790, 2020, [Online]. Available: <https://proceedings.unnes.ac.id/snipa/article/view/3811/3251>
- [2] U. Latipah and Z. Alamsyah, "Implementasi fuzzy mamdani sebagai pendukung keputusan pada sistem monitoring air layak konsumsi," vol. 4, no. 1, pp. 15–24, 2023, doi: <https://doi.org/10.37859/coscitech.v4i1.4479>.
- [3] D. Rahmawati, K. D. Ariyanto, H. Sukri, and D. N. Purnamasari, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Untuk Penyediaan Kualitas Air Dengan Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," pp. 94–102, [Online]. Available: <https://www.journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/649>
- [4] D. D. Sulistiyawati *et al.*, "Design and Implementation of an IoT-Based Roadside Air Quality Monitoring System Using ESP32 Multi-Sensor and Mamdani Fuzzy Logic Integrated with Blynk," vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2026, [Online]. Available: <https://journal.diginus.id/ELITS/article/view/765>
- [5] M. A. Kharim, T. Andrasto, A. F. Suni, and K. Fathoni, "Sistem Kontrol dan Monitoring Kualitas Air Reverse Osmosis (RO) Menggunakan Fuzzy Logic Metode Sugeno Berbasis Internet of Things," vol. 5, pp. 124–148, 2025, doi: <https://doi.org/10.31004/innovative.v5i3.18904>.
- [6] A. H. F. Mohamad Muchtarul Hadist1, Indah Sulistiyowati1, Syamsudduha Syahrinil1, "Sistem Pengambilan Keputusan Otomatis Berbasis Fuzzy Untuk Kelayakan Reuse Air Drain Mesin Retort," vol. 14, no. 1, 2026, doi: <https://doi.org/10.47662/alulum.v14i1.1171>.
- [7] 2Muchtar Ali Setyo Yudono *1Ervina Desviani Azzahra, "Pengembangan Sistem Deteksi Kebakaran Hutan Berbasis Esp32 Dan Panel Surya Menggunakan Logika Fuzzy Untuk Pemantauan Melalui Telegram," vol. 11, no. 1, pp. 111–122, 2025, doi: <https://doi.org/10.56521/teknika.v11i1.1419>.
- [8] H. Asysyauqi, M. F. Andriansyah, L. N. Ulla, and A. Sucipto, "Sistem Keamanan Pintu Otomatis Berbasis IoT dengan Teknologi RFID dan Aplikasi Mobile Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," no. April, 2025, doi: <https://doi.org/10.62951/modem.v3i2.405>.
- [9] A. W. Dani, D. Y. Siahaan, Y. Yuliza, and F. Sirait, "Rancang Bangun Smart Garden Untuk Budidaya Jamur Tiram Dengan Metode Sistem Fuzzy Mamdani Berbasis Internet Of Things (IoT)," vol. 13, no. 02, pp. 108–114, 2022, doi: [10.22441/jte.2022.v13i2.008](https://doi.org/10.22441/jte.2022.v13i2.008).
- [10] A. Trully, C. Losung, R. Kumalaka, Y. Agsbastian, M. Langie, and M. Kondo, "Simulasi dan Uji Fungsional Dashboard Monitoring Kualitas Air Kolam Ikan Berbasis MQTT," vol. 6, no. 4, pp. 1114–1122, 2026, doi: [10.47065/bulletincsr.v6i4.1108](https://doi.org/10.47065/bulletincsr.v6i4.1108).



- [11] A. Umbu *et al.*, “Sistem Pemantauan Kualitas Air Kolam Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Mengurangi Kematian Ikan Nila Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani,” vol. 4, no. 3, pp. 783–791, 2025, doi: <https://doi.org/10.55826/jtmit.v4i3.1010>.
- [12] A. N. K. Sholihah Ayu Wulandari*, 1, Adi Sucipto2, Ahmad Fahriyannur Rosyady3, Mohammad Dwiky Riza Ardana4, Octavian Dava Putra Cahyono5, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air Untuk Mendeteksi Keadaan Tidak Normal atau Penyakit Pada Tambak Ikan Mujaer Menggunakan Fuzzy Logic Mamdani Berbasis Mobile,” vol. 3, no. 1, pp. 42–54, 2024, doi: <https://doi.org/10.55043/technologica.v3i1.153>.
- [13] W. K. RI, “Pusat Data dan Informasi Kementrian Kesehatan RI.pdf”.
- [14] A. R. Duta, E. Nasrullah, and S. R. Sulistiyanti, “Pengendalian Kualitas Air Pada Akuarium Ikan Hias Mas Koki Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis IoT (Internet of Things),” vol. 13, no. 1, pp. 501–513, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5667>.
- [15] Z. Majidah, M. A. Bianto, and B. D. Saputra, “Implementasi Fuzzy Logic Mamdani Untuk Monitoring Kualitas Udara Berbasis Iot,” vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: 10.52060/juptik.v2i1.2091.
- [16] M. M. Richasanty Septima S, S.Si, *Referensi Sistem Inferensi Fuzzy*. 2023.
- [17] 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, doi: <https://doi.org/10.52436/1.jpti.458>.
- [18] E. Prastyo, “Penerapan Fuzzy Logic untuk Sistem Deteksi Banjir Menggunakan Mikrokontroler ESP32-CAM dan,” vol. 11, pp. 75–80, 2023, doi: <https://doi.org/10.70309/ticom.v11i2.85>.
- [19] M. Rizki, E. Darnila, and C. Agusniar, “Penerapan Logika Fuzzy Tsukamoto Pada Rancang Bangun Sistem Deteksi Kekurangan Air Budi Daya Ikan Lele,” vol. 9, no. 1, pp. 112–120, 2025, doi: <https://doi.org/10.46880/jmika.Vol9No1.pp112-120>.
- [20] U. Hasyim and T. Jombang, “Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis Internet Of Things (Iot) Dengan Soil Moisture Pada Proses Pembibitan Cabai Merah Keriting Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani,” vol. 3, no. 4, pp. 671–680, 2025, doi: <https://doi.org/10.61722/jipm.v3i4.1155>.