



RANCANG BANGUN PROTOTYPE ALAT PENGUKUR KUALITAS AIR SUMUR BERDASARKAN SALINITAS PH DAN KEKERUHAN MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC

Ilham Rizki Maulana^{1a}, Muchamad Malik¹, Agus Mukhtar¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Semarang

Korespondensi:

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Semarang
ilhamrizkimaulana31@gmail.com

ABSTRAK

Air tanah merupakan sumber utama air bersih yang digunakan oleh masyarakat untuk keperluan sehari-hari seperti mandi, mencuci, memasak, dan dikonsumsi. Namun, kualitas air sumur sering kali menurun akibat kontaminasi lingkungan seperti intrusi air laut, rembesan limbah domestik seperti rembesan *septic tank*, serta tingginya kandungan logam berat dan partikel tersuspensi. Permasalahan ini umumnya terjadi di daerah pesisir dan kawasan permukiman padat yang memiliki sistem sanitasi kurang memadai. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji *prototype* alat pengukur kualitas air sumur dengan metode *fuzzy logic* mamdani, yang mengklasifikasikan kualitas air ke dalam tiga kategori yaitu baik, cukup, dan buruk. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor salinitas, pH, dan *turbidity*. Data ditampilkan secara *real-time* pada layar LCD. Pengujian dilakukan terhadap sampel air sumur yang diambil di wilayah Kaligawe, Kota Semarang. Sensor salinitas menunjukkan akurasi sebesar 94,76%, dengan kadar garam mencapai 1.438 ppm, yang melebihi ambang batas air layak konsumsi. Sensor pH memiliki akurasi sebesar 92,90%, dengan nilai pH 7,9 yang masih berada dalam rentang standar (6,5–8,5). *Turbidity sensor* mencatat akurasi sebesar 90,89%, dengan nilai 10,6 NTU, yang berada di atas batas aman sebesar 5 NTU. Validasi dengan MATLAB menunjukkan deviasi rata-rata hanya 0,88%, menandakan sistem memiliki tingkat presisi yang sangat baik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa air sumur termasuk dalam kategori buruk dan tidak layak dikonsumsi, berdasarkan tingginya kadar garam yang melebihi ambang batas sesuai Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 2 Tahun 2023.

Kata kunci: kualitas air sumur, fuzzy logic mamdani, ESP32, salinitas, pH, kekeruhan

ABSTRACT

Groundwater is the main source of clean water used by people for daily needs such as bathing, washing, cooking, and consumption. However, the quality of well water often decreases due to environmental contamination such as seawater intrusion, domestic waste seepage such as septic tank seepage, and high content of heavy metals and suspended particles. This problem generally occurs in coastal areas and densely populated areas that have inadequate sanitation systems. This study aims to design and test a prototype of a well water quality measuring device using the Mamdani fuzzy logic method, which classifies water quality into three categories: good, sufficient, and poor. The system is designed using an ESP32 microcontroller integrated with salinity, pH, and turbidity sensors. Data is displayed in real-time on the LCD screen. Tests were carried out on well water samples taken in the Kaligawe area, Semarang City. The salinity sensor showed an accuracy of 94.76%, with a salt content reaching 1,438 ppm, which exceeds the threshold for drinkable water. The pH sensor has an accuracy of 92.90%, with a pH value of 7.9 which is still within the standard range (6.5–8.5). The turbidity sensor recorded an accuracy of 90.89%, with a value of 10.6 NTU, which is above the safe limit of 5 NTU. Validation with MATLAB showed

an average deviation of only 0.88%, indicating that the system has a very good level of precision. The results of the study showed that well water is categorized as bad and unfit for consumption, based on the high salt content that exceeds the threshold according to the Regulation of the Minister of Health of the Republic of Indonesia No. 2 of 2023.

Keywords: well water quality, mamdani fuzzy logic, ESP32, salinity, pH, turbidity

1. PENDAHULUAN

Air tanah merupakan sumber utama kebutuhan air masyarakat yang diperoleh melalui proses infiltrasi air hujan ke dalam tanah hingga mencapai lapisan akuifer[1,2]. Kualitas air tanah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti jenis tanah, pencemaran limbah domestik dan industri, serta intrusi air laut [2–6]. Sumur, sebagai sarana pemanfaatan air tanah, berperan penting dalam menunjang aktivitas sehari-hari. Karena itu, ketersediaan air yang bersih dan aman menjadi hal yang krusial bagi kesehatan masyarakat. Pengukuran kualitas air sumur diperlukan untuk memastikan kelayakan konsumsi serta mencegah potensi risiko kesehatan [7].

Kualitas air sumur dipengaruhi oleh faktor alami, seperti intrusi air laut serta keberadaan logam berat, seperti besi (Fe) dan mangan (Mn), yang dapat menyebabkan perubahan warna, peningkatan salinitas, penurunan pH, serta tingginya tingkat kekeruhan [8,9]. Selain itu, aktivitas manusia, seperti kebocoran *septic tank* dan limbah rumah tangga, turut mencemari air tanah, terutama di wilayah pesisir seperti Semarang yang menghadapi tekanan dari penggunaan air tanah berlebihan dan sistem sanitasi yang buruk [10]. Kondisi ini meningkatkan risiko kesehatan masyarakat akibat penggunaan air sumur yang tidak memenuhi standar kualitas, seperti tingginya salinitas, ketidaksesuaian pH, serta kekeruhan yang dapat menjadi indikator keberadaan partikel penyebab penyakit [11].

Selain permasalahan akses, kualitas air yang tidak memenuhi standar juga menjadi tantangan utama dalam penyediaan air bersih bagi masyarakat. Air yang layak digunakan harus memenuhi parameter kualitas air minum sesuai dengan ketentuan dalam Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492 Tahun 2010 yang telah diperbarui menjadi Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Persyaratan Kualitas Air Minum. Regulasi ini menetapkan batas maksimum kandungan zat-zat tertentu dalam air untuk memastikan kelayakan penggunaan. Air yang bersih didefinisikan sebagai air yang jernih, tidak berbau, tidak berasa, serta bebas dari kontaminan berbahaya, dan aman untuk keperluan sehari-hari. Kejernihan menjadi salah satu indikator utama kualitas air, sehingga pemantauan dan pengolahan yang efektif sangat diperlukan untuk memastikan air memenuhi standar kesehatan [12].

Pemantauan kualitas air sumur sangat penting untuk memastikan keamanan dan kesesuaiannya terhadap standar kualitas air [13–17]. Salah satu pendekatan yang efektif untuk mengendalikan parameter utama seperti salinitas, pH, dan kekeruhan adalah metode *fuzzy logic* mamdani [18–22]. Metode ini menawarkan mekanisme pengambilan keputusan berbasis logika kabur yang mampu mengolah data dari sensor salinitas, pH, dan *turbidity* secara dinamis. Sistem berbasis *fuzzy logic* mampu menyesuaikan dengan perubahan kondisi lingkungan dan menjaga parameter kualitas air dalam batas optimal. Penerapan sistem ini terbukti efektif dalam menjaga kualitas air dengan respons yang cepat dan akurasi tinggi. Oleh karena itu, implementasi metode *fuzzy logic* dapat menjadi solusi alternatif yang adaptif untuk menjaga keberlanjutan dan keamanan penggunaan air sumur, terutama di wilayah dengan tingkat kontaminasi atau fluktuasi kualitas air yang tinggi[23].

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun *prototype* alat pengukur kualitas air sumur yang mampu mengukur parameter salinitas, pH, dan kekeruhan dengan mengimplementasikan metode *fuzzy logic* mamdani untuk mengolah data sensor dan mengkategorikan kualitas air.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan

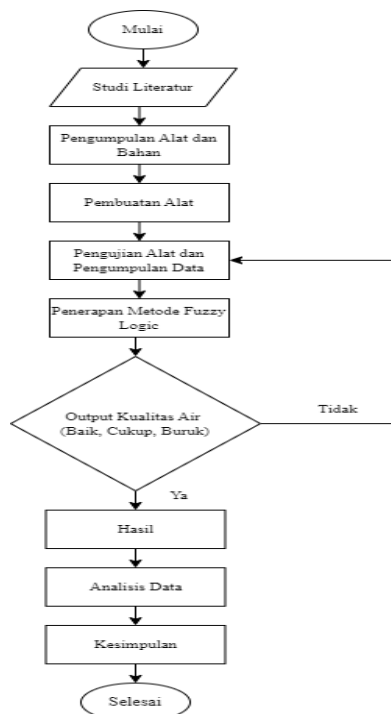
Penelitian ini memanfaatkan pendekatan eksperimental dengan membangun sebuah *prototype* sistem pemantauan kualitas air sumur. *Prototype* ini dirancang untuk mengintegrasikan beberapa komponen, antara lain:

- 1) Mikrokontroler ESP32
Berfungsi sebagai pusat kendali sistem, mengolah input dari sensor, dan menampilkan hasil ke layar LCD.
- 2) Sensor Salinitas
Untuk mendeteksi tingkat konduktivitas listrik sebagai indikator kadar garam dalam air dalam satuan (ppm).

- 3) Sensor pH
Digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air dengan akurasi tinggi.
- 4) *Turbidity Sensor*
Digunakan untuk mengukur kejernihan air dalam satuan *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU).
- 5) Layar LCD 20x4
Digunakan untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor secara waktu nyata.
- 6) LED Indikator (merah, kuning, hijau)
Digunakan untuk memberikan informasi visual terhadap status kualitas air.
- 7) Power Supply AC DC
Tegangan dari power supply 12 volt diturunkan menjadi 5 volt DC melalui *step-down* agar sesuai dengan spesifikasi operasional mikrokontroler dan sensor.
- 8) MATLAB
MATLAB merupakan software dan bahasa pemrograman yang digunakan untuk komputasi numerik, analisis data, dan visualisasi data.

2.2 Flowchart Penelitian

Berikut ini merupakan alur proses penelitian secara keseluruhan, mulai dari identifikasi masalah hingga implementasi dan evaluasi sistem yang dikembangkan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Alur *flowchart* penelitian ini dimulai dari studi literatur untuk mengkaji referensi yang relevan, dilanjutkan dengan identifikasi permasalahan terkait perancangan *prototype* alat pengukur kualitas air sumur dengan metode *fuzzy logic* mamdani. Setelah permasalahan dirumuskan, dilakukan pengumpulan bahan dan pembuatan alat, kemudian alat diuji untuk memperoleh data awal. Selanjutnya, data dari sensor salinitas, pH, dan *turbidity* dikumpulkan dan pengolahan data menggunakan metode *fuzzy* mamdani melalui simulasi dan pengujian. Jika hasil pengolahan data memenuhi kriteria, dilanjutkan dengan tahap analisis dan diskusi guna mengungkap temuan penting. Tahap akhir adalah penarikan kesimpulan dan pemberian saran. Bila data belum valid, proses kembali ke tahap pengumpulan data dalam siklus iteratif hingga kualitas data terpenuhi. Penelitian dianggap selesai setelah seluruh tahapan berhasil dilalui dan hasil siap dipublikasikan.

2.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 1. Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Nama Variabel	Keterangan
Variabel Bebas	Salinitas, pH, Kekeruhan	Parameter kualitas air sumur
Variabel Terikat	Kategori kualitas air	Output sistem <i>fuzzy</i> seperti Baik, Cukup, Buruk
Variabel Kontrol	Tegangan input, sampel air, dan lokasi	Kondisi lingkungan saat pengujian, larutan standar kalibrasi dan lokasi

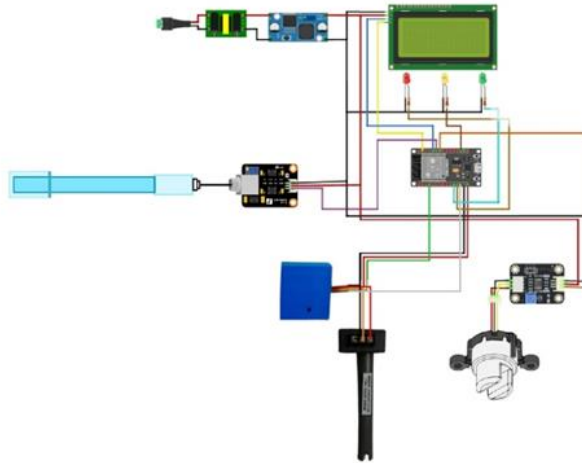
Hubungan antar variabel salinitas, pH, dan kekeruhan menunjukkan bahwa ketiga parameter tersebut saling memengaruhi dalam menentukan kelayakan air sumur. Sensor salinitas memberikan nilai 1.438 ppm, jauh melebihi ambang batas 500 ppm untuk air konsumsi, menjadikan salinitas sebagai faktor dominan penentu (buruk) dalam sistem *fuzzy*. Sensor pH menghasilkan nilai 7,9 berada dalam rentang ideal (6,5–8,5), sehingga memberikan kontribusi netral terhadap klasifikasi kualitas air. Di sisi lain, nilai kekeruhan sebesar 10,6 NTU melebihi ambang batas 5 NTU, namun masih tergolong sedang dalam sistem *fuzzy*. Berdasarkan kombinasi tersebut, logika *fuzzy* menetapkan *output* linguistik (buruk), yang diperkuat oleh perhitungan inferensi sistem. Validasi dengan MATLAB menunjukkan deviasi rata-rata hanya 0,88%, memperlihatkan bahwa hubungan antar *input* (salinitas, pH, kekeruhan) dan *output* (kategori air) terdefinisi dengan baik dalam struktur aturan *fuzzy*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menangani variasi *input* dan memberikan klasifikasi yang konsisten, meskipun diperlukan kalibrasi tambahan pada sensor salinitas dan *turbidity sensor* yang menunjukkan deviasi tertinggi dinilai ekstrem.

2.4 Metode Pengujian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan model *Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation* (ADDIE). Fokus metode diarahkan pada integrasi perangkat keras dan pemrosesan data berbasis *fuzzy logic*. Komponen utama terdiri dari mikrokontroler ESP32, sensor salinitas, sensor pH, *turbidity sensor*, layar LCD, dan indikator LED. Diagram alir penelitian diawali dengan studi literatur, identifikasi permasalahan, pembuatan alat, pengumpulan data, pemrosesan *fuzzy*, validasi, dan analisis. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi salinitas (ppm), pH, dan kekeruhan (NTU), yang masing-masing diklasifikasikan dalam tiga kondisi linguistik. Variabel terikat adalah kualitas air yang dibagi menjadi kategori baik, cukup, dan buruk. Variabel kontrol berupa tegangan *input* dan jenis sampel dijaga agar tetap konstan selama pengujian. Pengujian dilakukan melalui tiga tahap, yaitu kalibrasi sensor menggunakan larutan standar, uji sampel air sumur, dan validasi dengan referensi MATLAB. Data yang dikumpulkan diolah menggunakan *fuzzy logic* mamdani, dan hasil klasifikasi dievaluasi terhadap hasil pengolahan MATLAB untuk mengukur deviasi dan keandalan sistem.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Desain Rangkaian Alat



Gambar 2. Desain Rangkaian Alat

Desain rangkaian alat ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam rangkaian tersebut, modul LCD terhubung ke mikrokontroler ESP32 melalui pin SCL (pin 22) dan SDA (pin 21). Tiga buah LED indikator dipasang pada pin 12 (merah), pin 15 (kuning), dan pin 13 (hijau). Modul DMS yang digunakan untuk sensor salinitas dihubungkan ke pin 34 dan pin 13, dengan *output* probe salinitas menggunakan warna *orange*. Selanjutnya, sensor pH terhubung ke pin 19, sedangkan *turbidity sensor* dihubungkan ke pin 18 pada mikrokontroler ESP32.

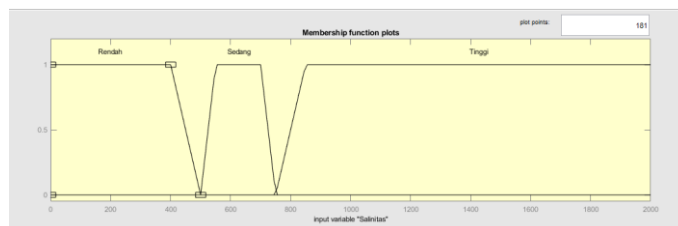
3.2 Perhitungan Sistem Logika Fuzzy Mamdani

Berikut ini merupakan penjelasan dari *input* variabel linguistik salinitas ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel linguistik *input* salinitas

No	Batasan <i>Input</i> Tegas	Variabel Fuzzy
1	0–500	Rendah
2	500–750	Sedang
3	750–2000	Tinggi

Tabel 2 mengklasifikasikan *input* linguistik salinitas ke dalam tiga kategori rendah (0–500), sedang (500–750), dan tinggi (750–2000). Gambar 3 menampilkan representasi grafik fungsi keanggotaan untuk setiap kategori.



Gambar 3. Grafik Keanggotaan Salinitas

Fungsi keanggotaan salinitas dibagi menjadi tiga kondisi linguistik rendah (0–500), sedang (500–750), dan tinggi (750–2000). Persamaan (1), (2), dan (3) merumuskan perhitungan nilai derajat keanggotaan untuk parameter keanggotaan salinitas.

$$\mu_{Sal\ Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & x < 200 \\ \frac{500-x}{500-200} & 200 \leq x \leq 500 \\ 0 & x > 500 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{Sal\ Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 500 \text{ atau } x \geq 750 \\ \frac{x-500}{550-500} & 500 < x < 550 \\ \frac{750-x}{750-550} & 550 < x < 750 \\ 1 & x \leq 700 \text{ dan } x \geq 750 \end{cases} \quad (2)$$

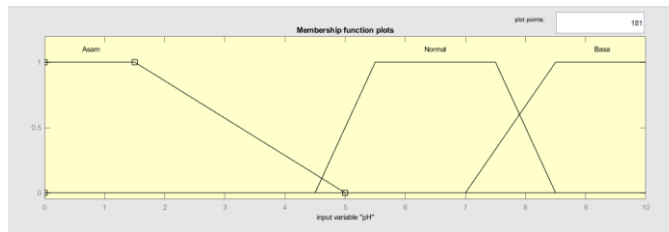
$$\mu_{Sal\ Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 750 \\ \frac{x-750}{2000-750} & 750 \leq x \leq 850 \\ 1 & x \geq 2000 \end{cases} \quad (3)$$

Berikut ini merupakan penjelasan dari *input* variabel linguistik pH ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel linguistik *input* pH

No	Batasan <i>input</i> tegas	Variabel <i>Fuzzy</i>
1	0–4.5	Asam
2	6.5–7.5	Normal
3	8.5–10	Basa

Tabel 3 mengklasifikasikan parameter pH ke dalam tiga kategori linguistik asam (0–4,5), normal (6,5–7,5), dan basa (8,5–10). Gambar 4 menampilkan representasi grafik fungsi keanggotaan untuk setiap kategori.



Gambar 4. Grafik Keanggotaan pH

Fungsi keanggotaan untuk parameter pH dibagi menjadi tiga kondisi linguistik asam (0–4,5), netral (6,5–7,5), dan basa (8,5–10). Persamaan (4), (5), dan (6) merumuskan perhitungan nilai derajat keanggotaan untuk parameter keanggotaan pH.

$$\mu_{Asam}(x) = \begin{cases} 1 & x < 1.5 \\ \frac{5-x}{5-1.5} & 1.5 \leq x \leq 5 \\ 0 & x > 5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 4.5 \text{ atau } x \geq 8.5 \\ \frac{x-4.5}{5.5-4.5} & 4.5 \leq x \leq 5.5 \\ \frac{8.5-x}{8.5-7.5} & 5.5 < x \leq 7.5 \\ 1 & 7.5 < x \leq 8.5 \end{cases} \quad (5)$$

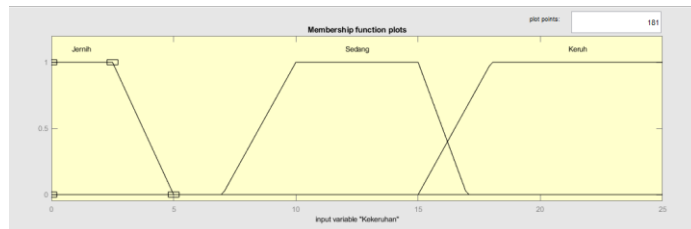
$$\mu_{Basah} = \begin{cases} 0 & x \leq 7 \\ \frac{x-7}{10-7} & 7 \leq x \leq 8.5 \\ 1 & x \geq 10 \end{cases} \quad (6)$$

Berikut ini merupakan penjelasan dari *input* variabel linguistik kekeruhan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Variabel linguistik *input* kekeruhan

No	Batasan <i>input</i> tegas	Variabel <i>Fuzzy</i>
1	0–5	Jernih
2	10–15	Sedang
3	15–25	Keruh

Tabel 4 mengelompokkan *input* linguistik untuk parameter kekeruhan ke dalam tiga kategori jernih (0–5), sedang (10–15), dan keruh (15–25). Gambar 5 menampilkan representasi grafik fungsi keanggotaan untuk setiap kategori.

**Gambar 5. Grafik Keanggotaan Kekeruhan**

Gambar 5 menunjukkan fungsi keanggotaan kekeruhan yang digambarkan dengan kurva trapesium berwarna hitam untuk tiga kondisi jernih (0–5), sedang (10–15), dan keruh (15–25). Persamaan (7), (8), dan (9) merumuskan perhitungan nilai derajat keanggotaan untuk parameter kekeruhan.

$$\mu_{Jernih} = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ \frac{x-0}{5-0} & 0 \leq x \leq 2.5 \\ 0 & x > 5 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{Sedang} = \begin{cases} 0 & x \leq 7 \text{ atau } x \geq 17 \\ \frac{x-7}{10-7} & 7 \leq x \leq 10 \\ \frac{17-x}{17-10} & 10 < x < 15 \\ 0 & x \leq 15 \text{ dan } x \geq 17 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{Keruh} = \begin{cases} 0 & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{25-15} & 15 \leq x \leq 25 \\ 1 & x \geq 25 \end{cases} \quad (9)$$

3.3 Hasil Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada *prototype* alat pengukur kualitas air sumur berdasarkan salinitas, pH, dan kekeruhan menggunakan metode *fuzzy logic* yaitu uji coba pada alat dan uji coba pada sistem. Berikut hasil pengujian dibawah ini:

Tabel 5. Hasil Pengujian Sensor Salinitas

No	Sampel Salinitas	Salt Meter	Sensor Salinitas	Akurasi (%)
1	Larutan Kalibrasi 500 ppm	500	528	29
2		501	533	33
3		501	528	27
4		501	532	29
5		501	528	27
6	Larutan Kalibrasi 750 ppm	750	792	43
7		747	789	41
8		750	792	43
9		753	792	39
10		752	790	38

11		1988	2020	32
12	Larutan Kalibrasi 2000 ppm	1993	2011	18
13		2000	2113	115
14		1998	2114	116
15		1999	2116	117
Rata-rata				94.76

Dari Tabel 5, hasil pengujian sensor salinitas menunjukkan variasi tingkat akurasi pada berbagai larutan kalibrasi. Pada larutan 500 ppm, sensor menunjukkan deviasi kecil dengan rata-rata kesalahan 29 ppm (ketidakakuratan 5,8%), mengindikasikan presisi yang cukup baik pada tingkat salinitas rendah. Namun, pada larutan 750 ppm kesalahan meningkat menjadi rata-rata 40,8 ppm (ketidakakuratan 5,44%), menunjukkan penurunan kinerja seiring kenaikan salinitas. Yang paling mencolok adalah ketidaksesuaian yang signifikan pada larutan 2000 ppm, dimana dua pengukuran (sampel 13–15) menunjukkan deviasi ekstrem sebesar ~115–117 ppm (ketidakakuratan 5,75–5,85%), sementara yang lain tetap dalam kisaran 18–32 ppm (0,9–1,6%). Hal ini mengindikasikan potensi *drift* sensor atau nonlinieritas pada konsentrasi tinggi. Rata-rata ketidakakuratan 94,76% (kemungkinan interpretasi keliru, sebaiknya dihitung ulang rata-rata kesalahan dalam ppm) mempertegas perlunya kalibrasi ulang khususnya untuk aplikasi salinitas tinggi. Penelitian lebih lanjut mengenai stabilitas sensor dan pengaruh lingkungan diperlukan untuk meningkatkan keandalan.

Tabel 6. Hasil Pengujian Sensor pH

No	Sampel pH	pH Meter	Sensor pH	Akurasi (%)
1	Larutan Kalibrasi 4	3.90	4.18	0.28
2		3.88	4.15	0.27
3		3.95	4.23	0.28
4		3.92	4.20	0.28
5		3.91	4.19	0.28
6	Larutan Kalibrasi 7	6.95	7.20	0.25
7		6.90	7.15	0.25
8		6.98	7.25	0.27
9		6.97	7.24	0.27
10		6.93	7.20	0.27
11	Larutan Kalibrasi 10	9.95	10.10	0.15
12		9.92	10.10	0.18
13		9.94	10.15	0.21
14		9.90	10.15	0.25
15		9.93	10.20	0.27
Rata-rata				92.90

Dari Tabel 6, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki akurasi yang bervariasi tergantung pada rentang pH yang diukur. Pada larutan kalibrasi pH 4, sensor menunjukkan deviasi rata-rata 0,28 unit pH (7% kesalahan relatif terhadap rentang pengukuran), dengan pola kesalahan yang konsisten di seluruh pengulangan. Pada larutan netral (pH 7), kesalahan berkurang menjadi 0,26 unit pH rata-rata (3,7% kesalahan relatif), menunjukkan kinerja yang lebih baik di area ini. Untuk larutan basa (pH 10), sensor menghasilkan deviasi paling kecil (0,21 unit pH rata-rata atau 2,1% kesalahan relatif), mengindikasikan presisi tertinggi pada pH alkali. Akurasi rata-rata keseluruhan sebesar 92,9%, (mengacu pada persentase kedekatan dengan nilai referensi) menunjukkan bahwa sensor ini memenuhi standar akurasi dasar, meskipun terdapat overestimasi sistematis di semua rentang pH (nilai sensor selalu lebih tinggi daripada pH meter). Kondisi ini mengindikasikan perlunya kalibrasi ulang secara berkala atau penerapan metode kompensasi *offset* untuk meningkatkan akurasi. Pengujian tambahan dengan sampel yang lebih beragam juga direkomendasikan untuk memverifikasi konsistensi kinerja sensor dalam berbagai kondisi lingkungan yang lebih kompleks.

Tabel 7. Hasil Pengujian Sensor Kekeruhan

No	Sampel Turbidity	Turbidity Sensor	Akurasi (%)
1	Larutan Kalibrasi 5 NTU	4.40	0.60
2		4.50	0.50
3		4.55	0.45
4		4.60	0.40
5		4.50	0.50
6	Larutan Kalibrasi 10 NTU	9.10	0.90
7		9.20	0.80
8		9.25	0.75
9		9.30	0.70
10		9.20	0.80
11	Larutan Kalibrasi 25 NTU	22.80	2.20
12		23.00	2.00
13		23.30	1.70
14		23.10	1.90
15		23.20	1.80
Rata-rata			90.89

Dari Tabel 7, hasil pengujian menunjukkan performa *turbidity sensor* yang konsisten dengan akurasi tinggi di berbagai rentang pengukuran. Pada larutan kalibrasi 5 NTU, sensor menghasilkan pengukuran rata-rata 4.51 NTU dengan deviasi absolut rata-rata 0.49 NTU (9.8% kesalahan relatif), menunjukkan ketelitian yang baik pada konsentrasi rendah. Di rentang 10 NTU, sensor mencatat nilai rata-rata 9.21 NTU dengan deviasi 0.79 NTU (7.9% kesalahan relatif), mengindikasikan peningkatan akurasi seiring kenaikan konsentrasi. Pada larutan 25 NTU, sensor mencapai deviasi terendah secara proporsional (1.92 NTU atau 7.68% kesalahan relatif) dengan nilai rata-rata 23.08 NTU, membuktikan stabilitas pengukuran di kisaran tinggi. Akurasi rata-rata keseluruhan mencapai 90.89%, menunjukkan kinerja sensor yang memadai untuk aplikasi lapangan, meskipun teramati pola underestimasi sistematis di semua level konsentrasi. Hasil ini merekomendasikan kalibrasi ulang dengan penyesuaian faktor koreksi untuk meningkatkan presisi, khususnya di kisaran konsentrasi rendah. Validasi lebih lanjut menggunakan sampel dengan matriks kompleks diperlukan untuk memastikan ketahanan sensor terhadap interferensi.

Tabel 8. Hasil Pengujian Rules *Fuzzy Logic* Mamdani

No	Salinitas	pH	Kekeruhan (NTU)	Output Sistem	Output Matlab	Akurasi %
1	530	4.18	4.40	38.5	39.0	1.28
2	532	4.15	4.50	37.9	38.2	0.79
3	527	4.23	4.55	38.8	39.1	0.77
4	531	4.20	4.60	39.0	39.4	1.02
5	528	4.19	4.50	38.7	39.1	1.02
6	794	7.20	9.10	59.0	59.4	0.67
7	790	7.15	9.20	58.8	59.2	0.68
8	793	7.25	9.25	59.3	59.7	0.67
9	791	7.24	9.30	59.2	59.6	0.67
10	788	7.20	9.20	59.1	59.5	0.67
11	2016	10.10	22.80	78.5	79.2	0.88
12	2010	10.10	23.00	78.7	79.5	1.01
13	2115	10.15	23.30	79.3	80.1	1.00
14	2110	10.15	23.10	79.1	79.9	1.00
15	2113	10.20	23.20	79.2	80.0	1.00
Rata-rata						0.88

Hasil validasi sistem *fuzzy logic* mamdani menunjukkan konsistensi tinggi antara *output* sistem dengan referensi MATLAB, dengan akurasi rata-rata 99.12%, (deviasi rata-rata 0.88%) di seluruh rentang pengukuran. Pada kondisi ekstrim (salinitas >2000 ppm, pH >10, dan *turbidity* >22 NTU), sistem mempertahankan deviasi

absolut rata-rata 0.93%, hanya sedikit lebih tinggi dibanding kondisi normal (0.71% deviasi). Pola *error* yang seragam di semua sampel mengindikasikan presisi aturan *fuzzy* yang terkalibrasi dengan baik, meskipun terdeteksi kesalahan sistematis minor (0.67-1.28%), yang mungkin berasal dari pembulatan nilai linguistik atau implementasi operator *fuzzy*. Kinerja optimal sistem ini terutama terlihat pada rentang menengah (*output* ~59 *unit*) dengan deviasi terendah (0.67% rata-rata), menunjukkan stabilitas proses inferensi ketika variabel *input* berada dalam domain fungsi keanggotaan optimal. Hasil ini membuktikan *robustness* algoritma Mamdani dalam menangani variasi *input* sensor sekaligus, namun disarankan untuk optimasi fungsi keanggotaan *boundary* guna mengurangi *error* dinilai ekstrim.

Penelitian ini dapat dikorelasikan dengan studi sejenis yang menggunakan sensor salinitas, sensor pH, dan *turbidity* sensor dengan metode *fuzzy logic* mamdani. Perbandingan hasil penelitian ini dengan hasil studi lain memungkinkan diperolehnya wawasan lebih mendalam mengenai kinerja sensor dalam berbagai kondisi. Selain itu, hal ini dapat memberikan evaluasi terhadap metode pengambilan dan analisis data yang digunakan, serta perbandingan dengan pendekatan dalam penelitian terdahulu untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif. Seperti penelitian yang dilakukan Zarkasyi *et al.* (2023), yang berjudul Purwarupa Sistem Monitoring Klasifikasi Mutu Air Sumur menggunakan Fuzzy Mamdani (Studi Kasus: Al-Maahira IIBS). Hasil penelitian yang dilakukan adalah pembangunan purwarupa sistem klasifikasi mutu air sumur menggunakan sensor pH, *turbidity*, TDS, dan MQ135, dengan memanfaatkan metode Fuzzy Mamdani serta *platform ThingSpeak* untuk pemantauan data dan menghasilkan akurasi sistem hingga 98,7%[24]. Penelitian yang dilakukan oleh Putra *et al.* (2025), yang berjudul rancang bangun sistem monitoring dan kontrol air pada tambak budidaya udang berbasis ESP32. Hasil penelitian yang dilakukan berfokus pada pemantauan kualitas air tambak udang menggunakan sensor kekeruhan, pH, dan salinitas, yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 dan dikontrol secara otomatis berdasarkan *output* dari sistem *fuzzy logic*, serta ditampilkan secara *real-time* melalui aplikasi Blynk[25]. Penelitian yang dilakukan Chaidir *et al.* (2025), yang berjudul Pengendalian Kualitas Air Minum Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis *Internet of Things*. Hasil penelitian yang dilakukan adalah perancangan sistem pemantauan kualitas air minum berbasis *IoT* dengan *input* berupa suhu, pH, TDS, dan kekeruhan, yang diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani dan menghasilkan akurasi sistem sebesar 90%[26].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian komprehensif terhadap sistem multisensor yang terintegrasi dengan algoritma *fuzzy logic* mamdani, penelitian ini berhasil mendemonstrasikan kemampuan sistem dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa sistem multisensor yang dirancang dan terintegrasi dengan algoritma *fuzzy logic* mamdani mampu memproses parameter salinitas, pH, dan kekeruhan secara efektif, dengan tingkat akurasi rata-rata di atas 90%, untuk setiap parameter. Validasi melalui perbandingan dengan hasil simulasi MATLAB memperlihatkan deviasi minimal, yaitu sebesar 0,67%, yang menandakan bahwa penerapan aturan *fuzzy* memberikan hasil yang konsisten dan sesuai dengan nilai referensi. Hasil ini membuktikan bahwa sistem memiliki performa yang andal untuk pemantauan kualitas air secara waktu nyata.
2. Meskipun sistem telah menunjukkan kinerja yang cukup baik, masih terdapat kesalahan sistematis berupa overestimasi pada pengukuran salinitas sebesar $\pm 5,8\%$, dan underestimasi pada pengukuran kekeruhan sebesar $\pm 7,7\%$. Ketidaktepatan ini diidentifikasi berasal dari aspek kalibrasi sensor serta bentuk fungsi keanggotaan *fuzzy* yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi lebih lanjut dengan pendekatan adaptif berbasis kondisi lingkungan. Selain itu, pengembangan sistem dengan integrasi metode *neuro-fuzzy* direkomendasikan untuk meningkatkan sensitivitas terhadap nilai ekstrem, serta pengujian lebih lanjut dalam kondisi dinamis dan sampel air yang lebih kompleks guna menjamin keandalan sistem secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Eko Wiyono A, Maharani Hidayat I, Mardhi Utami aini, Dwi Kusuma Putri T, Vika Rahmadhani Y, Suci Nurmalasari M, et al. Analisis Kadar Air, Daya Kembang dan Uji Organoleptik Kerupuk Tape Singkong Kuning dengan Konsentrasi Tape yang Berbeda. *Jurnal Kajian Dan Penelitian Umum* 2023;1:249–56. <https://doi.org/10.47861/jkpu-nalanda.v1i6.676>.
- [2] Darmanto D. Kajian Intrusi Air Laut Melalui Sungai di Pesisir Kabupaten Demak. *Majalah Geografi Indonesia* 2023;27:1–10.

- [3] Karadeniz S, Ustaoglu F, Aydın H, Yüksel B. Toxicological risk assessment using spring water quality indices in plateaus of Giresun Province/Türkiye: a holistic hydrogeochemical data analysis. *Environ Geochem Health* 2024;46. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02054-8>.
- [4] Forhad HM, Uddin MR, Chakrovorty RS, Ruhul AM, Faruk HM, Kamruzzaman S, et al. IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon* 2024;10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40746>.
- [5] Baird Rodger, Eaton AD., Rice EW., Bridgewater Laura. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association; 2017.
- [6] Bhatt S, Mishra AP, Chandra N, Sahu H, Chaurasia SK, Pande CB, et al. Characterizing seasonal, environmental and human-induced factors influencing the dynamics of Rispana River's water quality: Implications for sustainable river management. *Results in Engineering* 2024;22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102007>.
- [7] Mustafa M, Arnanto C. Rancang Bangun Monitoring Kualitas Air Berbasis IOT Sensor PH dan TDS 2024;167–75.
- [8] Mohamad MH bin, Rahman SMBA, Ahmad AA. Smart Water Quality Monitoring with the Implementation of IoT, 2024, p. 276–86. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-589-8_25.
- [9] Ujianti RMD, Novita M, Burhanuddin A, Muflihati I, Agung LA, Ingsan RN, et al. Analysis of water quality in watershed using heavy metal pollution index. *Depik* 2024;13:201–11. <https://doi.org/10.13170/depik.13.2.35680>.
- [10] Fitria Apriliani K, Ekonomi Pembangunan J, Ekonomi F, Negeri Semarang U. Analisi Potensi Lokal di Wilayah Pesisir Kabupaten Kendal dalam Upaya Mewujudkan Blue Economy. *Economics Development Analysis Journal* 2014;3.
- [11] Sari M, Huljana M. 3135-Article Text-8356-1-10-20190305. *Alkimia: Jurnal Ilmu Kimia Dan Terapan* 2019;3:1–5.
- [12] Setioningrum RNK, Sulistyorini L, Rahayu WI. Gambaran Kualitas Air Bersih Kawasan Domestik di Jawa Timur pada Tahun 2019. *Ikesma* 2020;16:87. <https://doi.org/10.19184/ikesma.v16i2.19045>.
- [13] Essamlali I, Nhaila H, El Khaili M. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon* 2024;10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27920>.
- [14] Lakshmikantha V, Hiriyannagowda A, Manjunath A, Patted A, Basavaiah J, Anthony AA. IoT based smart water quality monitoring system. *Global Transitions Proceedings* 2021;2:181–6. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.062>.
- [15] Zaidi Farouk MIH, Jamil Z, Abdul Latip MF. Towards online surface water quality monitoring technology: A review. *Environ Res* 2023;238. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147>.
- [16] Thiro Kabul Yunior Y. Sistem Monitoring Kualitas Air pada Budidaya Perikanan Berbasis IoT dan Manajemen Data Water Quality Monitoring System in Aquaculture Based on IoT and Data Management. *Citec Journal* 2019;6.
- [17] Pasika S, Gandla ST. Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. *Heliyon* 2020;6. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04096>.
- [18] Barak D, Jamshidi M. Fuzzy control of environmentally conscious refrigeration systems. *J Intell Manuf* 1994. <https://doi.org/10.1007/BF00123698>.
- [19] Malik M, Burhanuddin A. Desain Model Fuzzy Control UAV Berbasis MATLAB / SIMULINK. *Jurnal ENGINE : Energi, Manufaktur, Dan Material* 2018;2:19–24.
- [20] Dembélé D, Kastner P. Fuzzy C-Means Method for Clustering Microarray Data. vol. 19. 2003. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btg119>.
- [21] Wahyu Herman Susila, Wahyudi IS. Fuzzy inference system Model Sugeno Pada Pengendalian Suhu Ruangan. *Studies in Computational Intelligence* 2011;832:49–61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15585-8_4.
- [22] Patyra MJ, Long JE. Synthesis of current mode building blocks for fuzzy logic control circuits, 2002. <https://doi.org/10.1109/iscas.1994.409252>.
- [23] E. Rancang Bangun Sistem Monitoring Untuk Penyediaan Kualitas Air Dengan Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani n.d.:94–102.
- [24] Rifky M, Zarkasyi I, Hannats M, Ichsan H, Regasari R. Purwarupa Sistem Monitoring Klasifikasi Mutu Air Sumur menggunakan Fuzzy Mamdani (Studi Kasus : Al-Maahira IIBS) 2023;7.

- [25] Alif M, Putra A, Irawan D, Elektro ST, Teknik F, Gresik UM, et al. RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN KONTORL AIR PADA TAMBAK BUDIDAYA UDANG BERBASIS ESP32 2025;13.
- [26] Elriyan DI, Chaidir AR, Anam K. Pengendalian Kualitas Air Minum Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet of Things 2025.