

ANALISIS DESAIN FUZZY MAMDANI UNTUK KLASIFIKASI KUALITAS AIR BIOFLOK BERBASIS IOT

Gede Defry Widhi Adnyana¹, I Ketut Resika Arthana², Bagus Gede Krishna Yudistira³, Putu Zasya Eka Satya Nugraha⁴, Ja'far Shiddiq⁵, I Putu Romyadhy Mahaputra⁶

^{1,2,3,6} Jurusan Teknologi Informatika, Fakultas Teknik dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Ganesha; Jl. Udayana No.11, Banjar Tegal, Singaraja, Kabupaten Buleleng, Bali 81116

^{4,5} Dago Engineering; Jl. Bukit Dago Selatan No.27-29, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat; 40135

Keywords:

Biofloc, Water Quality, Mamdani Fuzzy, Membership Function, Internet of Things

Correspondent Email:

defry@student.undiksha.ac.id



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstrak. Kualitas air merupakan faktor utama dalam keberhasilan budidaya ikan berbasis bioflok karena secara langsung memengaruhi kesehatan ikan dan kestabilan mikroorganisme. Parameter suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS) umum digunakan sebagai indikator kualitas air, namun bersifat dinamis dan tidak memiliki batas nilai yang tegas. Logika fuzzy Mamdani banyak diterapkan untuk menangani ketidakpastian tersebut, tetapi sebagian penelitian belum menganalisis pengaruh desain fungsi keanggotaan dan jumlah basis aturan yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk fungsi keanggotaan dan jumlah aturan pada sistem logika fuzzy Mamdani terhadap klasifikasi kualitas air kolam bioflok. Data diperoleh dari sensor suhu, pH, dan TDS yang terpasang pada kolam bioflok dan digunakan sebagai nilai masukan pada pengujian sistem fuzzy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk fungsi keanggotaan memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jumlah aturan, khususnya pada kondisi transisi kualitas air. Fungsi keanggotaan Gaussian menghasilkan respons yang lebih halus, sedangkan penambahan jumlah aturan tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap hasil klasifikasi.

Abstract. Water quality is a critical factor in the success of biofloc-based aquaculture systems, as it directly affects fish health and microbial stability. Parameters such as temperature, pH, and total dissolved solids (TDS) are commonly used as indicators of water quality; however, these parameters are dynamic and do not have strict boundaries. Mamdani fuzzy logic has been widely applied to handle such uncertainties, but many studies have not analyzed the impact of membership function design and rule base size. This study aims to analyze the effect of variations in membership function types and rule base size on water quality classification in biofloc fish ponds. Data were obtained from temperature, pH, and TDS sensors installed in a biofloc pond and used as input for fuzzy system evaluation. The results show that the shape of the membership function has a more significant impact than the number of rules, particularly in transition conditions. Gaussian membership functions produce smoother responses, while increasing the number of rules does not significantly affect classification results.

1. PENDAHULUAN

Biofloc Technology (BFT) merupakan pendekatan akuakultur intensif yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme heterotrof untuk mengonversi limbah organik dan nitrogen terlarut menjadi biomassa yang bermanfaat di dalam kolam budidaya. Keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada kestabilan parameter kualitas air yang bersifat dinamis, saling berinteraksi, dan sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan kolam. Parameter utama seperti suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS) secara langsung memengaruhi laju metabolisme ikan serta keseimbangan ekosistem mikroba pengurai di dalam flock. Sebagai contoh, fluktuasi minor pada suhu dan pH dapat mengubah tingkat toksisitas amonia serta memengaruhi efisiensi bakteri heterotrof dalam mengasimilasi nitrogen terlarut. Studi empiris menunjukkan bahwa ketidakstabilan parameter-parameter fisik dan kimia tersebut secara signifikan dapat menurunkan performa pertumbuhan organisme budidaya [1], serta memicu tingkat stres yang tinggi hingga meningkatkan angka mortalitas secara drastis [2].

Pemantauan kualitas air secara konvensional yang mengandalkan batas nilai tegas (threshold) atau pengukuran manual memiliki keterbatasan besar dalam merepresentasikan kondisi nyata perairan, terutama dalam mendeteksi fase transisi kritis yang terjadi secara bertahap. Untuk mengatasi kendala operasional tersebut, arsitektur Internet of Things (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 telah mulai diimplementasikan secara efektif untuk pemantauan real-time dan otomatisasi sistem pakan pada kolam bioflok nila [3]. Meskipun infrastruktur IoT mampu menyediakan akuisisi data lingkungan secara berkelanjutan [4], data mentah dari sensor di lapangan sering kali fluktuatif akibat derau (noise) lingkungan perairan [5] dan mengandung ketidakpastian pembacaan yang tinggi [6]. Oleh karena itu, integrasi logika fuzzy Mamdani menjadi sangat krusial karena kemampuannya mengintegrasikan berbagai parameter kualitas air yang ambigu untuk menghasilkan keputusan kontrol yang adaptif [7], otomatis [8], dan andal dalam pemantauan iklim mikro kolam [9]. Penerapan pendekatan logika fuzzy ini terbukti jauh lebih fleksibel

dibandingkan metode ambang batas kaku [10], khususnya dalam mengklasifikasikan kondisi kualitas air yang berada di dekat batas kelas kualitas perairan [11].

Meskipun logika fuzzy Mamdani sangat potensial ketika dipadukan dengan infrastruktur IoT, sebagian besar penelitian terdahulu cenderung mengimplementasikan sistem fuzzy secara langsung menggunakan desain fungsi keanggotaan (membership function) bawaan tanpa melakukan analisis komparatif yang sistematis. Padahal, karakteristik geometris kurva fungsi keanggotaan—seperti Gaussian, triangular, maupun trapezoidal—memiliki dampak langsung terhadap nilai overshoot, tingkat sensitivitas, dan kehalusan respons keluaran sistem kendali [12], [13]. Di samping bentuk kurva, ukuran atau jumlah aturan (rule base) dalam mekanisme inferensi juga memengaruhi kompleksitas pemodelan matematis serta efisiensi beban komputasi perangkat keras [14]. Dalam konteks klasifikasi kualitas air spesifik bioflok, kajian yang mengevaluasi secara mendalam keterkaitan antara variasi bentuk fungsi keanggotaan [15] dengan minimalisasi redundansi struktur basis aturan [16] masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis mendalam mengenai pengaruh variasi desain fungsi keanggotaan dan skala ukuran basis aturan pada sistem logika fuzzy Mamdani terhadap akurasi dan sensitivitas klasifikasi kualitas air kolam bioflok nila. Melalui pendekatan komparatif ini, diharapkan dapat dirumuskan sebuah konfigurasi sistem fuzzy yang tidak hanya akurat secara diagnostik tetapi juga efisien secara komputasi untuk implementasi perangkat pemantauan real-time di lapangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Bioflok dan Kualitas Air

Sistem budidaya berbasis bioflok (Biofloc Technology/BFT) merupakan metode akuakultur intensif yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme heterotrof untuk mengolah limbah organik menjadi sumber nutrisi tambahan bagi ikan. Sistem ini mampu meningkatkan efisiensi pakan dan menjaga keberlanjutan lingkungan budidaya. Namun, keberhasilan sistem bioflok sangat bergantung pada kestabilan kualitas air, karena fluktuasi

parameter fisik dan kimia dapat memengaruhi kesehatan ikan serta keseimbangan ekosistem mikroba di dalam kolam [1], [2].

Parameter utama yang umum digunakan dalam pemantauan kualitas air meliputi suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS). Suhu berperan dalam mengatur metabolisme ikan dan aktivitas mikroorganisme, sedangkan pH memengaruhi keseimbangan biologis dan reaksi kimia dalam air. TDS mencerminkan jumlah zat terlarut yang berkaitan dengan konsentrasi bahan organik dan mikroorganisme dalam sistem bioflok [11], [12]. Oleh karena itu, pemantauan parameter kualitas air secara kontinu menjadi aspek penting dalam pengelolaan budidaya berbasis bioflok.

2.2. Internet of Things dalam Monitoring Kualitas Air

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan kualitas air secara real-time melalui penggunaan sensor yang terintegrasi dengan sistem komunikasi data. Dalam konteks akuakultur, IoT memungkinkan pengambilan data suhu, pH, dan TDS secara kontinu sehingga kondisi kolam dapat dipantau secara lebih akurat dan efisien [4].

Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang dikombinasikan dengan metode kecerdasan buatan, termasuk logika fuzzy, untuk meningkatkan kemampuan analisis dan pengambilan keputusan. Integrasi IoT dan logika fuzzy terbukti mampu mengatasi ketidakpastian data sensor dan memberikan interpretasi kondisi lingkungan secara lebih adaptif [6], [7], [14], [16]. Dengan demikian, kombinasi IoT dan logika fuzzy menjadi pendekatan yang potensial dalam sistem monitoring kualitas air modern.

2.3. Logika Fuzzy Mamdani

Logika fuzzy merupakan metode yang digunakan untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas dalam sistem yang melibatkan variabel linguistik. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah logika fuzzy Mamdani, yang merepresentasikan pengetahuan dalam bentuk aturan IF-THEN berbasis bahasa alami. Metode ini banyak diterapkan dalam berbagai sistem pengambilan

keputusan, termasuk dalam penilaian kualitas lingkungan dan akuakultur [5], [6], [7].

Proses dalam sistem fuzzy Mamdani meliputi fuzzifikasi, evaluasi aturan, agregasi, dan defuzzifikasi. Metode ini memiliki keunggulan dalam kemampuannya untuk merepresentasikan penilaian manusia secara fleksibel serta menghasilkan keluaran yang lebih adaptif terhadap perubahan nilai input. Oleh karena itu, fuzzy Mamdani banyak digunakan dalam sistem klasifikasi kualitas air yang memiliki karakteristik data yang dinamis dan tidak pasti.

Penerapan logika fuzzy Mamdani dalam sistem berbasis Internet of Things juga telah digunakan pada berbagai sistem kontrol lingkungan, seperti pengaturan suhu ruangan secara otomatis menggunakan sensor dan aturan linguistik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode ini mampu menghasilkan pengambilan keputusan yang lebih fleksibel dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan secara real-time [17].

2.4. Fungsi Keanggotaan dan Basis Aturan

Fungsi keanggotaan digunakan untuk memetakan nilai input ke dalam derajat keanggotaan dalam suatu himpunan fuzzy. Bentuk fungsi keanggotaan yang umum digunakan meliputi fungsi segitiga, trapesium, dan Gaussian. Fungsi segitiga dan trapesium banyak digunakan karena kesederhanaannya, sedangkan fungsi Gaussian mampu menghasilkan transisi yang lebih halus pada batas antar kelas [8], [9], [18].

Selain fungsi keanggotaan, basis aturan juga merupakan komponen penting dalam sistem fuzzy. Basis aturan berfungsi untuk menghubungkan kondisi input dengan keluaran melalui aturan IF-THEN. Jumlah dan kompleksitas aturan dapat memengaruhi performa sistem fuzzy. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah aturan tidak selalu menghasilkan peningkatan kualitas keluaran secara signifikan, terutama jika aturan utama telah mampu merepresentasikan kondisi sistem dengan baik [10], [18].

3. METODE PENELITIAN

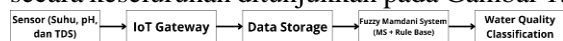
3.1. Kerangka Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menganalisis

pengaruh desain sistem logika fuzzy Mamdani terhadap hasil klasifikasi kualitas air pada kolam bioflok ikan nila. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi pengaruh variasi fungsi keanggotaan dan jumlah aturan terhadap stabilitas dan konsistensi keluaran sistem fuzzy.

Secara umum, alur penelitian dimulai dari pengambilan data kualitas air menggunakan sensor yang terpasang langsung pada kolam bioflok, dilanjutkan dengan pengiriman data secara real-time melalui sistem Internet of Things (IoT). Data yang diperoleh kemudian diproses menggunakan sistem logika fuzzy Mamdani dengan berbagai konfigurasi desain, sehingga memungkinkan dilakukan perbandingan hasil klasifikasi kualitas air berdasarkan variasi fungsi keanggotaan dan jumlah aturan yang diterapkan.

Simulasi sistem logika fuzzy pada penelitian ini dilakukan menggunakan MATLAB R2024b dengan bantuan Fuzzy Logic Toolbox. Perangkat lunak ini digunakan untuk merancang fungsi keanggotaan, menyusun basis aturan, serta melakukan proses inferensi dan defuzzifikasi. Kerangka penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

3.2. Akuisisi Data

Data penelitian diperoleh dari sensor suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS) yang dipasang secara langsung pada kolam budidaya ikan nila berbasis bioflok. Sensor terhubung ke modul IoT yang berfungsi sebagai pengirim data ke server penyimpanan. Proses pengambilan data dilakukan secara periodik sehingga diperoleh data kualitas air yang bersifat kontinu dan merepresentasikan kondisi nyata kolam.

Karakteristik data yang dihasilkan bersifat fluktuatif dan tidak memiliki batas nilai yang tegas, khususnya pada sistem bioflok yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme dan rasio karbon terhadap nitrogen (C/N). Oleh karena itu, data ini sesuai untuk dianalisis menggunakan pendekatan logika fuzzy yang mampu menangani ketidakpastian dan perubahan gradual pada nilai parameter.

Data yang diperoleh dari sistem IoT digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai masukan pada pengujian sistem fuzzy. Beberapa sampel data dipilih untuk

merepresentasikan kondisi kualitas air buruk, transisi, dan baik, sehingga memungkinkan analisis respons sistem terhadap berbagai kondisi nyata di lapangan.

3.3. Perancangan Sistem Logika Fuzzy

Sistem logika fuzzy Mamdani dirancang dengan tiga variabel input, yaitu suhu, pH, dan total dissolved solids, serta satu variabel keluaran berupa kualitas air. Variabel keluaran diklasifikasikan ke dalam dua kategori linguistik, yaitu buruk dan baik. Proses inferensi fuzzy terdiri atas empat tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan (rule evaluation), agregasi, dan defuzzifikasi.

3.3.1. Fuzzifikasi dan Fungsi Keanggotaan

Tahap fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai crisp input ke dalam derajat keanggotaan berdasarkan fungsi keanggotaan.

a. Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga didefinisikan sebagai:

$$\mu_{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

di mana $a, b, dan c$ merupakan parameter batas bawah, titik puncak, dan batas atas fungsi

b. Fungsi Keanggotaan Trapezium

Fungsi keanggotaan trapesium didefinisikan sebagai:

$$\mu_{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$$

di mana $a, b, c dan d$ yang merepresentasikan bentuk trapesium.

c. Fungsi Keanggotaan Gaussian

Fungsi keanggotaan Gaussian dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu_{gaussian}(x, c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

di mana c merupakan pusat fungsi dan σ adalah parameter deviasi standar yang mengontrol lebar kurva. Bentuk fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium banyak digunakan karena

kesederhanaannya, sedangkan gaussian sering dipilih untuk menghasilkan transisi yang lebih halus [12], [13], [19].

3.3.2. Inferensi Fuzzy Mamdani

Pada tahap inferensi, setiap aturan IF-THEN dievaluasi menggunakan operator logika fuzzy. Operasi AND direpresentasikan menggunakan operator minimum:

$$\alpha_i = \min(\mu_1, \mu_2, \mu_3)$$

di mana α_i adalah derajat aktivasi aturan ke-i. Proses agregasi seluruh aturan dilakukan menggunakan operator maksimum:

$$\mu_{agg}(x) = \max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

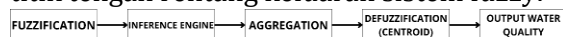
3.3.3. Defuzzifikasi Metode Centroid

Tahap defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode centroid (center of gravity), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Q^* = \frac{\int x \mu_{agg}(x) dx}{\int \mu_{agg}(x) dx}$$

di mana Q^* merupakan nilai crisp keluaran sistem fuzzy dan $\mu_{agg}(x)$ adalah fungsi keanggotaan hasil agregasi. Tahap defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode centroid untuk memperoleh nilai keluaran crisp yang merepresentasikan kondisi kualitas air. Metode centroid merupakan teknik defuzzifikasi yang paling umum digunakan dalam sistem Mamdani karena menghasilkan keluaran yang stabil dan representatif [19].

Diagram proses inferensi fuzzy Mamdani ditunjukkan pada Gambar 2. Himpunan semesta untuk masing-masing variabel input ditentukan berdasarkan rentang nilai operasional pada sistem bioflok ikan nila, yaitu suhu [18–38] °C, pH [5,5–8,6], dan TDS [500–1800] mg/L. Nilai crisp hasil defuzzifikasi berada pada rentang 0–100. Untuk keperluan klasifikasi, nilai keluaran dibagi menjadi dua kategori, yaitu kondisi buruk dan baik. Nilai di bawah 40 dikategorikan sebagai kualitas air buruk, sedangkan nilai sama dengan atau di atas 40 dikategorikan sebagai kualitas air baik. Penentuan threshold ini didasarkan pada titik tengah rentang keluaran sistem fuzzy.



Gambar 2. Proses Inferensi Logika Fuzzy

3.4. Variasi Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan dirancang untuk merepresentasikan interpretasi linguistik parameter kualitas air berdasarkan rentang optimal yang diperoleh dari literatur untuk ikan nila yang dibudidayakan dalam sistem bioflok. Tiga variabel masukan dipertimbangkan, yaitu suhu, pH, dan total padatan terlarut (TDS). Untuk setiap variabel, tiga istilah linguistik didefinisikan untuk mencerminkan kondisi operasi rendah, optimal, dan tinggi. Untuk mengisolasi pengaruh bentuk MF pada kinerja klasifikasi, rentang linguistik yang identik diterapkan di berbagai jenis MF, termasuk fungsi segitiga, trapesium, dan Gaussian. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa variasi bentuk fungsi keanggotaan dapat memengaruhi sensitivitas dan kehalusan keluaran sistem fuzzy secara signifikan [12], [13], [19].

Tabel 1. Rentang Linguistik Parameter Kualitas Air

Parameter	Linguistic Term	Range	Unit
Suhu	Rendah	18 – 26	C
	Normal	24 – 32	C
	Tinggi	30 - 38	C
pH	Asam	5.5 – 7.0	-
	Netral	6.8 – 7.6	-
	Basa	7.4 – 8.6	-
TDS	Rendah	500 – 1000	mg/L
TDS	Normal	800 – 1500	mg/L
	Tinggi	1300 - 1800	mg/L

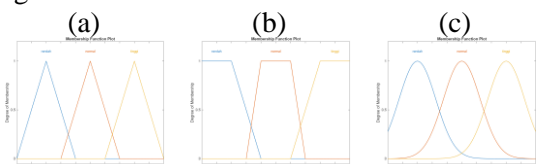
Fungsi keanggotaan suhu didefinisikan berdasarkan kondisi termal optimal yang dilaporkan untuk ikan nila, di mana pertumbuhan stabil dan aktivitas metabolisme biasanya diamati dalam kisaran sekitar 26–30 °C [18]. Dengan demikian, rentang linguistik untuk suhu didefinisikan sebagai Rendah (18–26 °C), Normal (24–32 °C), dan Tinggi (30–38 °C) [18], dengan wilayah yang tumpang tindih untuk mengakomodasi transisi bertahap dalam respons fisiologis.

Untuk pH, fungsi keanggotaan dibangun berdasarkan studi biofloc dan budidaya ikan nila yang menunjukkan bahwa kondisi mendekati netral optimal untuk stabilitas biologis dan pertumbuhan ikan. Rentang linguistik pH didefinisikan sebagai Asam (5,5–7,0), Netral (6,8–7,6), dan Basa (7,4–8,6) [2],

dengan memasukkan tumpang tindih untuk mewakili ketidakpastian di sekitar nilai batas.

Berbeda dengan sistem air tawar konvensional, budidaya berbasis bioflok ditandai dengan peningkatan padatan terlarut akibat biomassa mikroba dan bahan organik. Fungsi keanggotaan TDS didefinisikan berdasarkan data eksperimental ikan nila, di mana Gurung dkk [20] melaporkan rentang operasional yang luas. Berdasarkan referensi tersebut, rentang linguistik TDS ditetapkan dalam satuan mg/L sebagai berikut: Rendah (500–1000 mg/L), Normal (800–1500 mg/L), dan Tinggi (1300–1800 mg/L). Rentang ini dirancang saling tumpang tindih (overlap) untuk mengakomodasi ketidakpastian pembacaan sensor pada kondisi transisi. Rentang linguistik untuk suhu, pH, dan TDS yang digunakan dalam desain fungsi keanggotaan dirangkum dalam Tabel 1.

Gambar 3 mengilustrasikan variasi bentuk fungsi keanggotaan masukan sambil mempertahankan rentang linguistik yang identik. Desain ini memungkinkan perbandingan langsung tentang bagaimana bentuk MF yang berbeda memengaruhi kelancaran dan sensitivitas proses inferensi fuzzy tanpa mengubah makna semantik variabel masukan. Pada fungsi keanggotaan Gaussian, parameter deviasi standar (σ) ditentukan berdasarkan lebar rentang masing-masing variabel input. Nilai σ disesuaikan agar mencerminkan tingkat penyebaran data pada setiap parameter, sehingga transisi antar himpunan fuzzy dapat berlangsung secara halus tanpa mengubah makna linguistik yang digunakan.



Gambar 3. Variasi fungsi keanggotaan yang digunakan dalam sistem fuzzy Mamdani untuk suhu dalam bentuk: (a) segitiga, (b) trapesium, dan (c) Gaussian

3.5. Konfigurasi Basis Aturan

Basis aturan merupakan komponen utama dalam sistem inferensi fuzzy Mamdani yang berfungsi untuk merepresentasikan pengetahuan pakar dalam bentuk aturan IF–THEN. Pada penelitian ini, aturan disusun

berdasarkan kombinasi kondisi suhu, pH, dan TDS yang merepresentasikan kualitas air kolam bioflok.

Untuk menganalisis pengaruh kompleksitas desain terhadap kinerja sistem, penelitian ini menerapkan dua konfigurasi basis aturan yang berbeda:

1. Basis Aturan Lengkap (27 Aturan): Jumlah ini diperoleh melalui metode grid partitioning dengan perhitungan kombinasi faktorial penuh (full factorial) dari tiga variabel input yang masing-masing memiliki tiga fungsi keanggotaan ($3 \times 3 \times 3 = 27$ aturan). Konfigurasi ini bertujuan memetakan seluruh kemungkinan ruang keadaan secara komprehensif.
2. Basis Aturan Sederhana (9 Aturan): Konfigurasi ini merupakan bentuk reduksi aturan (rule reduction) yang difokuskan pada kondisi-kondisi representatif utama. Tujuannya adalah menguji efisiensi komputasi sistem untuk implementasi pada perangkat IoT dengan sumber daya terbatas, namun tetap mempertahankan akurasi klasifikasi.

Pengaruh jumlah aturan terhadap keluaran sistem fuzzy telah dilaporkan dalam berbagai penelitian, yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah rule tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan performa sistem [10], [18]. Konstruksi dan Justifikasi Basis Aturan Penyusunan konten aturan dilakukan secara sistematis dengan merujuk langsung pada definisi himpunan fuzzy yang tercantum dalam Tabel 1. Setiap anteseden aturan (bagian IF) merepresentasikan kombinasi istilah linguistik yang batas nilainya telah ditetapkan secara kuantitatif berdasarkan literatur. Konsistensi antara Tabel 1 dan basis aturan ini krusial untuk memastikan bahwa logika inferensi berjalan selaras dengan toleransi biologis ikan nila.

Sebagai ilustrasi, aturan R14 pada Tabel 3 menetapkan keluaran "Baik" hanya jika seluruh parameter masukan berada pada kategori "Normal" sesuai Tabel 1 (Suhu 24–32 °C, pH 6,8–7,6, dan TDS 800–1500 mg/L). Kombinasi di luar rentang optimal tersebut secara tegas diklasifikasikan sebagai "Buruk". Pendekatan ketat (strict) ini didasarkan pada prinsip faktor pembatas (limiting factor) dalam sistem bioflok, di mana kegagalan pada satu parameter saja (misalnya TDS rendah yang

mengindikasikan belum terbentuknya flok) dapat mendestabilisasi ekosistem kolam secara keseluruhan, meskipun parameter suhu dan pH berada pada kondisi ideal.

Tabel 2. Basis Aturan Sederhana

Rule	Suhu	pH	TDS	Output
R1	Normal	Netral	Sedang	Baik
R2	Normal	Netral	Tinggi	Baik
R3	Normal	Netral	Rendah	Buruk
R4	Rendah	Netral	Sedang	Buruk
R5	Tinggi	Netral	Sedang	Buruk
R6	Normal	Asam	Sedang	Buruk
R7	Normal	Basa	Sedang	Buruk
R8	Rendah	Asam	Rendah	Buruk
R9	Tinggi	Basa	Tinggi	Buruk

Tabel 3. Basis Aturan Lengkap

Rule	Suhu	pH	TDS	Output
R1	Rendah	Asam	Rendah	Buruk
R2	Rendah	Asam	Sedang	Buruk
R3	Rendah	Asam	Tinggi	Buruk
R4	Rendah	Netral	Rendah	Buruk
R5	Rendah	Netral	Sedang	Buruk
R6	Rendah	Netral	Tinggi	Buruk
R7	Rendah	Basa	Rendah	Buruk
R8	Rendah	Basa	Sedang	Buruk
R9	Rendah	Basa	Tinggi	Buruk
R10	Normal	Asam	Rendah	Buruk
R11	Normal	Asam	Sedang	Buruk
R12	Normal	Asam	Tinggi	Buruk
R13	Normal	Netral	Rendah	Buruk
R14	Normal	Netral	Sedang	Baik
R15	Normal	Netral	Tinggi	Baik
R16	Normal	Basa	Rendah	Buruk
R17	Normal	Basa	Sedang	Buruk
R18	Normal	Basa	Tinggi	Buruk
R19	Tinggi	Asam	Rendah	Buruk
R20	Tinggi	Asam	Sedang	Buruk
R21	Tinggi	Asam	Tinggi	Buruk
R22	Tinggi	Netral	Rendah	Buruk
R23	Tinggi	Netral	Sedang	Buruk
R24	Tinggi	Netral	Tinggi	Buruk
R25	Tinggi	Basa	Rendah	Buruk
R26	Tinggi	Basa	Sedang	Buruk
R27	Tinggi	Basa	Tinggi	Buruk

3.6. Evaluasi

Evaluasi sistem fuzzy dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi kualitas air dari setiap konfigurasi desain sistem fuzzy. Kriteria evaluasi meliputi konsistensi

keluaran sistem terhadap perubahan nilai input, stabilitas hasil klasifikasi pada kondisi nilai parameter yang berada di sekitar batas kelas, serta kompleksitas sistem yang ditinjau dari jumlah fungsi keanggotaan dan aturan yang digunakan.

Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi konfigurasi desain sistem logika fuzzy Mamdani yang paling sesuai untuk diterapkan pada sistem monitoring kualitas air kolam bioflok ikan nila berbasis IoT. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap beberapa kombinasi nilai input untuk mengamati konsistensi keluaran sistem fuzzy pada berbagai kondisi parameter kualitas air.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Perilaku Keluaran Sistem

Pengujian awal dilakukan untuk mengevaluasi perilaku keluaran sistem logika fuzzy Mamdani pada beberapa kondisi kualitas air yang merepresentasikan keadaan buruk, transisi, dan baik. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem fuzzy yang dirancang menghasilkan keluaran yang konsisten dan sesuai dengan logika penilaian kualitas air sebelum dilakukan analisis komparatif lebih lanjut.

Berdasarkan hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 4, sistem fuzzy menghasilkan nilai keluaran rendah pada kondisi kualitas air buruk, dengan nilai berkisar antara 19,7 hingga 23,1. Nilai ini berada jauh di bawah batas transisi dan secara konsisten diklasifikasikan sebagai kondisi buruk. Sebaliknya, pada kondisi kualitas air baik, seluruh konfigurasi sistem menghasilkan nilai keluaran yang tinggi, yaitu di atas 70, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali kondisi optimal kolam bioflok dengan baik.

Pada kondisi transisi, keluaran sistem berada di antara kondisi buruk dan baik, dengan variasi nilai yang mencerminkan sifat gradual dari sistem fuzzy. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak menghasilkan perubahan keluaran yang bersifat diskrit atau meloncat secara tiba-tiba ketika nilai parameter berada di sekitar batas kelas. Perilaku ini menegaskan bahwa proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi telah berjalan dengan benar serta mampu merepresentasikan ketidakpastian yang melekat pada penilaian kualitas air kolam bioflok.

Tabel 4. Nilai Keluaran Sistem Fuzzy untuk Berbagai Konfigurasi

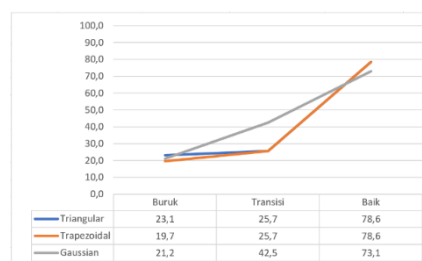
Kondisi	Tria 9	Tria 27	Trap 9	Trap 27	Gauss 9	Gauss 27
Buruk	23,1	23,1	19,7	19,7	21,2	21,2
Transisi	25,7	25,7	25,7	25,7	42,5	42,5
Baik	78,6	78,6	78,6	78,6	73,6	73,1

4.2. Pengaruh Variasi Fungsi Keanggotaan

Analisis selanjutnya difokuskan pada pengaruh variasi bentuk fungsi keanggotaan terhadap hasil klasifikasi kualitas air. Pada pengujian ini, sistem fuzzy diuji menggunakan tiga bentuk fungsi keanggotaan, yaitu segitiga, trapesium, dan Gaussian, dengan rentang linguistik dan basis aturan yang identik.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa bentuk fungsi keanggotaan memiliki pengaruh yang nyata terhadap nilai keluaran sistem, khususnya pada kondisi transisi. Pada kondisi ini, fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium menghasilkan nilai keluaran yang relatif rendah dan masih cenderung diklasifikasikan sebagai kondisi buruk. Sebaliknya, fungsi keanggotaan Gaussian menghasilkan nilai keluaran yang lebih tinggi, yaitu sekitar 42,5, yang menunjukkan karakteristik transisi yang lebih halus. Respons ini meminimalkan risiko perubahan status mendadak yang sering menyebabkan kesalahan penanganan pada sistem kontrol otomatis. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa fungsi Gaussian memberikan transisi yang lebih gradual dibandingkan fungsi segitiga atau trapesium [12], [13], [19].

Perbedaan ini dapat dijelaskan dari karakteristik bentuk fungsi keanggotaan Gaussian yang memiliki transisi lebih halus dibandingkan fungsi segitiga dan trapesium. Sifat ini menyebabkan lebih banyak aturan fuzzy yang teraktivasi secara parsial pada kondisi transisi, sehingga nilai keluaran menjadi lebih moderat. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan bentuk fungsi keanggotaan berperan penting dalam menentukan sensitivitas dan kelancaran respons sistem fuzzy, terutama pada kondisi kualitas air yang berada di sekitar batas klasifikasi.



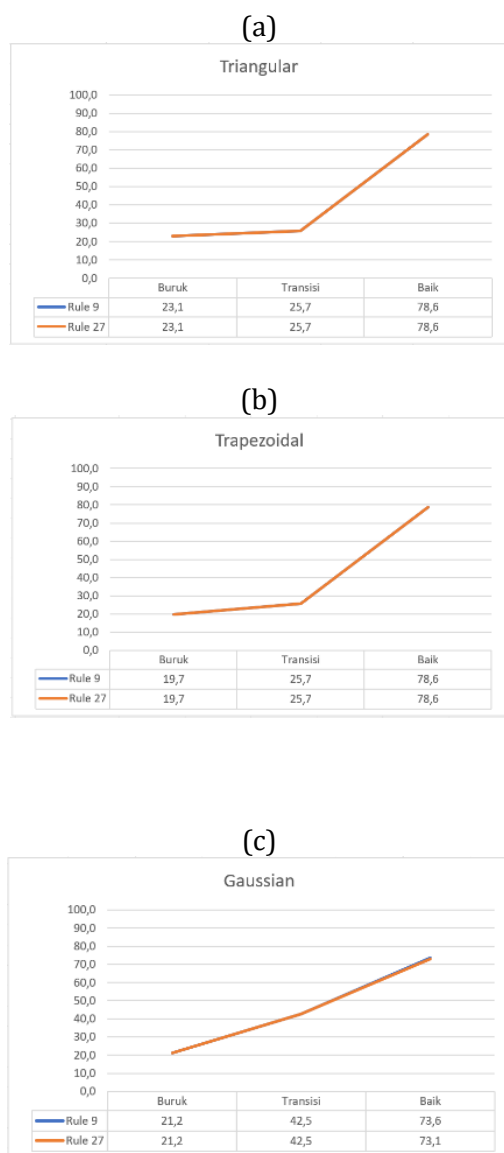
Gambar 4. Perbandingan Nilai Keluaran Berdasarkan Bentuk Fungsi Keanggotaan

4.3. Pengaruh Ukuran Basis Aturan

Selain variasi fungsi keanggotaan, penelitian ini juga mengevaluasi pengaruh jumlah aturan terhadap hasil klasifikasi kualitas air dengan membandingkan basis aturan minimal (9 aturan) dan basis aturan lengkap (27 aturan). Pengujian dilakukan menggunakan nilai masukan yang sama untuk memastikan perbandingan yang adil antar konfigurasi sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan antara sistem fuzzy dengan 9 aturan dan 27 aturan pada seluruh kondisi uji. Nilai keluaran yang dihasilkan oleh kedua konfigurasi aturan menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi, baik pada kondisi buruk, transisi, maupun baik. Hal ini mengindikasikan bahwa aturan-aturan utama yang merepresentasikan kondisi dominan kualitas air telah tercakup dengan baik pada basis aturan minimal.

Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah aturan tidak selalu meningkatkan performa sistem fuzzy secara signifikan, terutama ketika kondisi utama sistem telah terwakili oleh aturan-aturan inti. Dengan demikian, penggunaan basis aturan yang lebih sederhana dapat menjadi alternatif yang efisien dari sisi kompleksitas komputasi tanpa mengorbankan konsistensi hasil klasifikasi kualitas air pada kondisi uji utama. Hasil ini sejalan dengan temuan Eminog dan Altas [14] yang menunjukkan bahwa penambahan jumlah rule tidak selalu meningkatkan respons sistem secara signifikan.



Gambar 5. Perbandingan Keluaran Berdasarkan Jumlah Aturan: (a) Triangular, (b) Trapesium, dan (c) Gaussian

4.4. Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain sistem logika fuzzy Mamdani memberikan keluaran yang konsisten dan dapat dijelaskan secara logis untuk penilaian kualitas air kolam bioflok ikan nila. Secara umum, sistem mampu membedakan kondisi kualitas air buruk, transisi, dan baik dengan nilai keluaran yang sesuai dengan ekspektasi biologis dan operasional sistem bioflok.

Salah satu temuan utama dari penelitian ini adalah bahwa bentuk fungsi keanggotaan memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jumlah aturan dalam menentukan

nilai keluaran sistem, khususnya pada kondisi transisi. Fungsi keanggotaan Gaussian menghasilkan nilai keluaran yang lebih tinggi dan lebih moderat pada kondisi transisi dibandingkan fungsi segitiga dan trapesium. Hal ini dapat dijelaskan oleh karakteristik fungsi Gaussian yang memiliki perubahan derajat keanggotaan yang lebih halus, sehingga memungkinkan lebih banyak aturan fuzzy teraktivasi secara parsial. Sebaliknya, fungsi segitiga dan trapesium memiliki perubahan keanggotaan yang lebih tajam, sehingga respons sistem cenderung lebih kaku ketika nilai masukan berada di sekitar batas kelas.

Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar logika fuzzy yang menekankan pentingnya representasi transisi gradual pada sistem yang mengandung ketidakpastian. Dalam konteks pemantauan kualitas air bioflok, kondisi perairan sering kali tidak berada sepenuhnya pada satu kategori tertentu, melainkan berada di antara kondisi optimal dan tidak optimal. Oleh karena itu, penggunaan fungsi keanggotaan dengan transisi yang lebih halus, seperti Gaussian, menawarkan pendekatan konservatif (conservative approach) yang krusial untuk stabilitas bioflok. Dengan mendeteksi fase transisi lebih awal (nilai keluaran ~42.5), sistem memberikan waktu respons yang lebih panjang bagi operator untuk melakukan intervensi sebelum kualitas air mencapai level kritis (crash).

Di sisi lain, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penambahan jumlah aturan dari 9 menjadi 27 tidak memberikan perbedaan signifikan pada nilai keluaran sistem untuk kondisi uji utama. Hal ini mengindikasikan bahwa aturan-aturan inti yang merepresentasikan kondisi dominan kualitas air telah tercakup dengan baik pada basis aturan minimal. Dengan kata lain, kompleksitas sistem fuzzy tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kualitas hasil klasifikasi, terutama ketika variabel masukan dan rentang linguistik telah didefinisikan secara tepat.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa sistem fuzzy dengan basis aturan yang lebih sederhana berpotensi digunakan untuk implementasi sistem monitoring kualitas air berbasis IoT dengan beban komputasi yang lebih rendah, tanpa mengorbankan konsistensi hasil klasifikasi. Hal ini menjadi penting pada aplikasi pemantauan real-time, di mana

efisiensi pemrosesan dan stabilitas sistem menjadi faktor utama.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan desain sistem fuzzy Mamdani, khususnya bentuk fungsi keanggotaan, merupakan faktor kunci dalam menentukan sensitivitas dan kelancaran respons sistem dalam menilai kualitas air kolam bioflok. Temuan ini dapat digunakan sebagai dasar rasional dalam pemilihan konfigurasi sistem fuzzy pada penelitian lanjutan maupun pada pengembangan sistem monitoring kualitas air bioflok berbasis IoT di lapangan.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis pengaruh desain sistem logika fuzzy Mamdani terhadap klasifikasi kualitas air kolam bioflok ikan nila dengan memanfaatkan data suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS) yang diperoleh melalui sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Fokus penelitian diarahkan pada evaluasi pengaruh variasi bentuk fungsi keanggotaan dan jumlah basis aturan terhadap perilaku keluaran sistem fuzzy.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem fuzzy Mamdani mampu menghasilkan keluaran yang konsisten dan logis untuk kondisi kualitas air buruk, transisi, dan baik. Nilai keluaran rendah diperoleh pada kondisi kualitas air yang tidak optimal, sedangkan nilai keluaran tinggi dihasilkan pada kondisi kualitas air yang mendekati optimal, dengan transisi keluaran yang bersifat gradual di sekitar batas klasifikasi.

Berdasarkan analisis komparatif, bentuk fungsi keanggotaan terbukti memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jumlah aturan dalam menentukan sensitivitas dan kelancaran respons sistem. Fungsi keanggotaan Gaussian menghasilkan respons yang lebih halus dan nilai keluaran yang lebih moderat pada kondisi transisi dibandingkan fungsi segitiga dan trapesium. Sebaliknya, penambahan jumlah aturan dari 9 menjadi 27 tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada nilai keluaran sistem untuk kondisi uji utama, yang mengindikasikan bahwa aturan-aturan inti telah terwakili dengan baik pada basis aturan minimal.

Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kompleksitas sistem fuzzy tidak selalu menghasilkan peningkatan kualitas hasil klasifikasi. Dengan desain fungsi keanggotaan

dan rentang linguistik yang tepat, membuktikan bahwa reduksi aturan (rule reduction) adalah strategi yang viabel (viable). Kompleksitas aturan yang tinggi (27 rules) terbukti redundan (berlebihan) karena 9 aturan inti telah cukup untuk menangkap dinamika utama parameter bioflok. Hal ini menjadi penting untuk implementasi sistem monitoring kualitas air bioflok berbasis IoT yang membutuhkan pemrosesan real-time dan stabilitas sistem.

Sebagai arah penelitian selanjutnya, sistem fuzzy yang dikembangkan dapat diperluas dengan penambahan parameter kualitas air lainnya, integrasi metode pembelajaran untuk penyesuaian fungsi keanggotaan secara adaptif, atau evaluasi performa sistem menggunakan data lapangan dalam jangka waktu yang lebih Panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya dalam pengembangan sistem Internet of Things dan proses pengujian yang dilakukan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing dan rekan-rekan yang telah memberikan masukan serta bantuan selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Guimar *et al.*, "Does the Biofloc System Affect Water Quality, Reproduction, and Hemato-Immunology of *Penaeus vannamei* During Broodstock Maturation?," pp. 1–15, 2025.
- [2] Y. A. Alkhamis *et al.*, "Review Article The Impact of Biofloc Technology on Water Quality in Aquaculture: A Systematic Meta-Analysis," vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9915874.
- [3] B. Gede *et al.*, "Smart Fisheries: Real-Time Water Quality Management and Automated Feeding System Design for Tilapia Farming using ESP32 Micro Controller," vol. 5, no. 2, pp. 827–832, 2025, doi: 10.30811/jaise.v5i2.7288.
- [4] M. Flores-Iwasaki, G. A. Guadalupe, M. Pachas-Caycho, S. Chapa-Gonza, R. C. Mori-Zabarburú, and J. C. Guerrero-Abad, "Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis," *AgriEngineering*,

- vol. 7, no. 3, pp. 1–28, 2025, doi: 10.3390/agriengineering7030078.
- [5] 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,” *J. Tek. Inform.*, vol. 6, no. 5, pp. 3079–3092, 2025, doi: 10.52436/1.jutif.2025.6.5.5249.
- [6] A. F. Choiri, “IoT-Based Water Quality Monitoring System for Fish Ponds Using Fuzzy Inference Method,” *J. Teknol. Inf. Dan Terap. (J-TIT)*, vol. 11, no. 2, pp. 2580–2291, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10/25047/jtit.v11i2.5794>
- [7] S. K. Nagothu, P. Bindu Sri, G. Anitha, S. Vincent, and O. P. Kumar, “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.
- [8] M. Qomaruddin, A. Riansyah, and H. M. Hermawan, “Mamdani fuzzy-based water quality monitoring and control system in vannamei shrimp farming using the internet of things,” *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 180–187, 2024, doi: 10.11591/ijaas.v13.i1.pp180-187.
- [9] D. Wicaksono, A. Mareta, B. E. Adiana, and D. J. N. Salim, “Fuzzy Logic-Based Aquaculture Climate Control System Design On A Fishpond,” *J. Infotel*, vol. 17, no. 2, pp. 357–376, 2025, doi: 10.20895/infotel.v17i2.1152.
- [10] A. Lokman, W. Z. W. Ismail, N. A. A. Aziz, and A. K. Ghazali, “Interactive Fuzzy Logic Interface for Enhanced Real-Time Water Quality Index Monitoring,” *Algorithms*, vol. 18, no. 9, pp. 1–28, 2025, doi: 10.3390/a18090591.
- [11] J. C. Escalante-Mamani *et al.*, “Design and Validation of an IoT-Integrated Fuzzy Logic Controller for High-Altitude NFT Hydroponic Systems: A Case Study in Cusco, Peru,” *Electron.*, vol. 14, no. 18, pp. 1–29, 2025, doi: 10.3390/electronics14183740.
- [12] P. Chitikunnan, R. Chotikunnan, Y. Pititheeraphab, and T. Puttasakul, “Comparative Analysis of Fuzzy Membership Functions for Step and Smooth Input Tracking in a 3-Axis Robotic Manipulator,” vol. 3, no. 1, 2025, doi: 10.59247/jfsc.v3i1.278.
- [13] Stabania Chowdhury and R. Kar, “Evaluation of approximate Fuzzy Membership Function using Linguistic Input-an Approached Based on Cubic Spline,” *JINAV J. Inf. Vis.*, vol. 1, no. 2, pp. 53–59, 2020, doi: 10.35877/454ri.jinav215.
- [14] Ç. Eminog and Ç. H. Altas, “The effects of the number of rules on the output of a fuzzy logic controller employed to a PMDC motor,” vol. 24, 1998.
- [15] F. Ramdani *et al.*, “Prediction of Water Quality in Ponds Based on Temperature, Water Clarity, pH, and Dissolved Oxygen Using Mamdani Fuzzy Logic,” *J. Appl. Sci. Technol. Humanit.*, vol. 2, no. 2, pp. 149–161, 2025, doi: 10.62535/n729q614.
- [16] H. Pujiharsono and D. Kurnianto, “Mamdani fuzzy inference system for mapping water quality level of biofloc ponds in catfish cultivation,” *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 8, no. 2, pp. 84–88, 2020, doi: 10.14710/jtsiskom.8.2.2020.84-88.
- [17] A. sandy azhari Azhari, A. R. D. -, M. A. R. -, and Y. C. P. -, “Perancangan Dan Simulasi Sistem Air Conditioner Pintar Untuk Kenyamanan Suhu Ruang Kelas Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani Berbasis Iot,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 14, no. 1, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8416.
- [18] J. Ndau and P. Vilhelm, “Capacity for thermal adaptation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): Effects on oxygen uptake and ventilation,” *J. Therm. Biol.*, vol. 105, no. November 2021, p. 103206, 2022, doi: 10.1016/j.jtherbio.2022.103206.
- [19] F. Bellini, Y. Barzegar, A. Barzegar, S. Marrone, L. Verde, and P. Pisani, “Sustainable Water Quality Evaluation Based on Cohesive Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference System in Tivoli (Italy),” *Sustain.*, vol. 17, no. 2, 2025, doi: 10.3390/su17020579.
- [20] S. Gurung, S. Rai, D. K. Jha, R. B. Mandal, and H. Luitel, “Examination of different C/N ratios, heterotrophic bacteria and plankton abundance on the growth of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in biofloc system,” *Our Nat.*, vol. 23, no. 2, pp. 19–33, 2025, doi: 10.3126/on.v23i2.82818.