

Pengembangan Sistem Kendali Otomatis Kualitas Air Kolam Bioflok Berbasis Fuzzy Sugeno

Muhammad Nafis Aisy Zhofron¹, Tri Kuntoro Priyambodo², Agfianto Eko Putra³

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, FMIPA, UGM, Yogyakarta, Indonesia

²Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA, UGM, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: 1muhammad.nafais477890@mail.ugm.ac.id, 2matri@ugm.ac.id, 3agfi@ugm.ac.id

Abstrak

Budidaya ikan air tawar dengan sistem bioflok telah menjadi solusi inovatif dalam meningkatkan produktivitas serta efisiensi penggunaan air dan pakan. Namun, tantangan utama dalam sistem ini adalah menjaga kualitas air tetap optimal secara berkelanjutan. Penelitian ini mengembangkan sistem kendali kualitas air berbasis logika Fuzzy Sugeno yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 dual-core untuk mengotomatisasi pemantauan dan pengendalian parameter suhu, pH, serta kekeruhan air secara real-time. Penggunaan ESP32 memungkinkan pengolahan data yang lebih cepat dan efisien berkat fitur dual-core yang mendukung pemrosesan sensor dan aktuator secara simultan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode Fuzzy Sugeno mampu memberikan respons kendali yang lebih presisi dibandingkan dengan sistem manual. Meskipun sistem kendali telah bekerja sesuai rancangan, sensor amonia yang dibuat menggunakan kombinasi sensor warna TCS3200 dan kertas uji amonia masih memerlukan pengembangan lebih lanjut karena belum mampu mendeteksi amonia secara aktual. Dengan peningkatan ini, sistem diharapkan dapat menjadi solusi efektif dalam otomatisasi pemeliharaan kualitas air kolam dan meningkatkan keberlanjutan produksi akuakultur..

Kata kunci— Bioflok, Kendali Kualitas Air, ESP32, Fuzzy Sugeno, Otomatisasi

Abstract

Freshwater fish farming using the biofloc system has become an innovative solution to improve productivity while optimizing water and feed usage. However, maintaining optimal water quality continuously remains a challenge. This study developed a water quality control system based on Fuzzy Sugeno logic, implemented on a dual-core ESP32 microcontroller to automate real-time monitoring and control of temperature, pH, and turbidity parameters. The ESP32's dual-core feature allows for efficient sensor data processing and actuator execution simultaneously.

Testing results indicate that the Fuzzy Sugeno method provides more precise control responses compared to manual systems. Although the control system functions as designed, the ammonia sensor—comprising a TCS3200 color sensor combined with ammonia test paper—still requires further development as it cannot detect ammonia levels accurately. With these enhancements, the system is expected to serve as an effective automation solution for maintaining water quality in fish farming and promoting sustainable aquaculture production.

Keywords—Biofloc, Water Quality Control, ESP32, Fuzzy Sugeno, Automation

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi perikanan yang sangat besar, baik di perairan laut maupun air tawar. Sebagai negara kepulauan dengan ribuan pulau, Indonesia memiliki kekayaan sumber daya perikanan yang melimpah. Khusus untuk perikanan air tawar, ikan seperti lele, nila, dan mas menjadi pilihan utama bagi masyarakat. Minat konsumsi ikan air tawar di Indonesia terus meningkat, seiring dengan kesadaran akan pentingnya protein hewani dalam pola makan sehat.

Volume impor hasil perikanan utama Indonesia pada tahun 2018 sejumlah 273.728,14 ton dan pada tahun 2023 mengalami kenaikan menjadi sejumlah 366.791,62 ton [1]. Namun, nilai volume eksportnya pada tahun 2018 dan 2023 cenderung tetap pada kisaran nilai 122.000 ton [1]. Selain itu, harga ikan air tawar hasil budidaya dari tahun 2018 sampai 2022 mengalami peningkatan [2]. Produksi ikan air tawar komoditas utama pada rentang tahun 2019 sampai 2023 memiliki rata-rata sebesar 3.447.345 ton dari hasil kolam budidaya dengan luas lahan rata-rata tahun 2019 sampai tahun 2023 sebesar 2.758.088.809 m² [3]. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa rata-rata produktivitas kolam budidaya dalam kg/m² setiap tahunnya pada rentang tahun 2019 sampai 2023 adalah 1,3 kg/m² [3]. Hal ini menunjukkan masih rendahnya produktivitas ikan air tawar dalam negeri. Hal tersebut disebabkan metode budidaya yang masih dilakukan secara konvensional.

Sistem budidaya bioflok merupakan cara terbaru budidaya perairan yang dapat meningkatkan produktivitas serta menghemat penggunaan air dan pakan [4]. Sistem bioflok adalah sistem yang mengatur limbah air [5]. Sistem bioflok bergantung pada daur ulang dan penggunaan ulang limbah ikan melalui ekosistem yang melibatkan mikroorganisme, alga bakteri, dan protozoa [6], yang membentuk bioflok dan berperan sebagai pakan tambahan alami ikan [7]. Terdapat parameter yang perlu dipantau secara terus-menerus berupa pH, temperature, volume air, kadar amonia, TDS, kekeruhan, dan pasokan oksigen [6], di mana parameter-parameter tersebut saling berkaitan atau mempengaruhi satu sama lain. Keberhasilan sistem bioflok bergantung pada bagaimana pembudidaya mempertahankan kualitas air yang optimal, di mana hal tersebut menjadi tantangan yang berat bagi pembudidaya [6].

Kelemahan manusia seperti lupa atau sibuk dan mengabaikan perawatan kolam meskipun sudah dibantu dengan teknologi pemantauan IoT dari penelitian terdahulu [8]. Terdapat penelitian yang dilakukan oleh Bakhit et al. yang membuat sistem monitoring real-time parameter-parameter kualitas kolam bioflok [9] dan penelitian yang dilakukan oleh Hidayat et al. yang membuat sistem pemantauan parameter kualitas air yang dapat menentukan kondisi kualitas air ideal atau tidak dengan menggunakan logika Fuzzy Mamdani [10]. Abid et al. membuat sistem pemantauan amonia pada kolam bioflok dengan sensor gas MQ7 dan MQ135, di mana sensor tersebut mendeteksi amonia dalam fasa gas [11]. Adapun penelitian baru yang melengkapi penelitian-penelitian tersebut, yaitu dengan sistem kontrol otomatis yang dilakukan oleh Shafkat dan Islam dengan setiap parameter memiliki keputusan yang independen atau tidak terkait dengan parameter lain [5]. Namun penelitian-penelitian tersebut masih memiliki kekurangan antara lain pendekripsi parameter kualitas kolam yang masih belum tepat, yaitu pendekripsi amonia dalam fasa gas, penggunaan kipas sebagai pendingin air kolam bioflok yang kurang efektif untuk kolam terutama kolam outdoor, penggunaan logika Fuzzy Mamdani yang bersifat pengelompokan secara linguistik yang hanya cocok untuk sistem pemantauan pasif, dan penggunaan logika pengambilan keputusan independen dalam sistem kontrol parameter kualitas kolam yang dapat menyebabkan sistem mengalami kesalahan penanganan atau pembuatan keputusan.

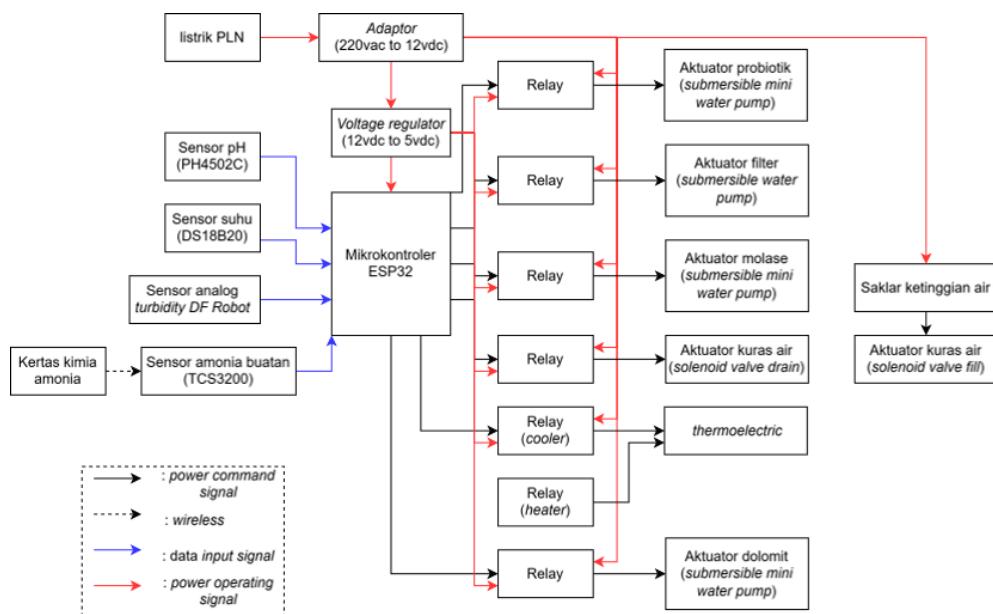
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan penelitian terdahulu dengan membuat sistem pemantauan dan kendali otomatis (aktif) kolam bioflok dengan sensor deteksi amonia cair, sistem pengaturan suhu thermoelectric, penerapan logika keputusan antara

parameter yang saling terkait (dependen), dan penerapan logika Fuzzy Sugeno untuk menentukan eksekusi sistem.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Sistem

Sistem kendali otomatis kualitas air kolam bioflok yang dikembangkan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sensor, mikrokontroler, aktuator, dan sistem komunikasi data. Mikrokontroler yang digunakan adalah ESP32 dual-core, yang memungkinkan pengolahan data sensor secara paralel dan efisien. Diagram blok sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



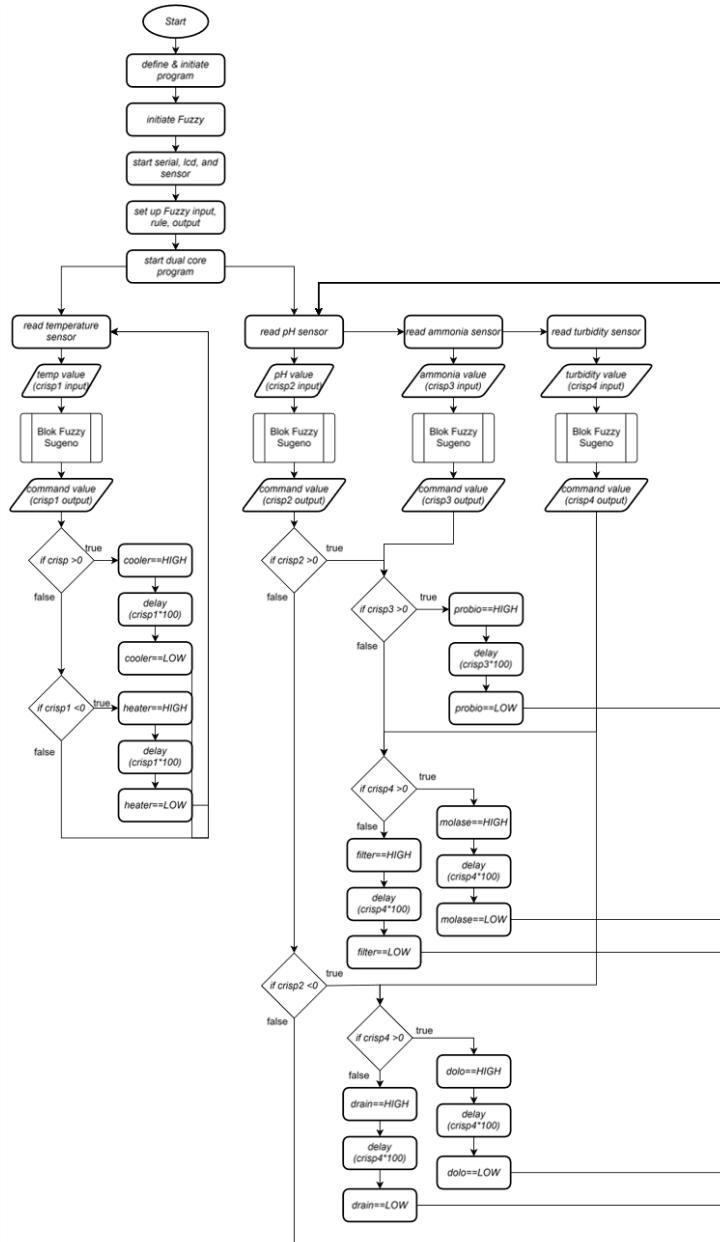
Gambar 1 Blok diagram rancangan sistem cerdas kolam bioflok

2.2 Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C++ pada platform Arduino IDE dengan *flowchart* program seperti pada gambar 2. Sistem ini terdiri dari 3 bagian program, yaitu program baca sensor, program pengolahan, dan program kendali atau logikan pengambilan keputusan. Sistem ini mengimplementasikan logika Fuzzy Sugeno sebagai program pengolah untuk menentukan tindakan korektif berdasarkan data yang diterima dari sensor. Proses *fuzzification* dilakukan dengan membagi parameter kualitas air ke dalam tiga kategori: rendah, normal, dan tinggi.

Selanjutnya, sistem inferensi fuzzy digunakan untuk menetapkan aturan yang akan dijalankan, sedangkan proses *defuzzification* menghasilkan keluaran numerik untuk mengontrol aktuator. Setelah program-program selesai dibuat, program diterapkan pada perangkat keras dengan mengunggahnya ke ESP32.

Sebelum digabungkan menjadi satu program, setiap program dibuat dan diuji secara terpisah. Pembuatan program dimulai dengan program pembacaan sensor suhu, pH, kekeruhan, dan amonia. Setelah itu, dibuat program Fuzzy Sugeno dengan urutan yang sama, yaitu diawali suhu dan diakhiri amonia. Setelah itu baru membuat program utama yang sudah memuat logika pengambilan keputusan dan kendali aktuator.

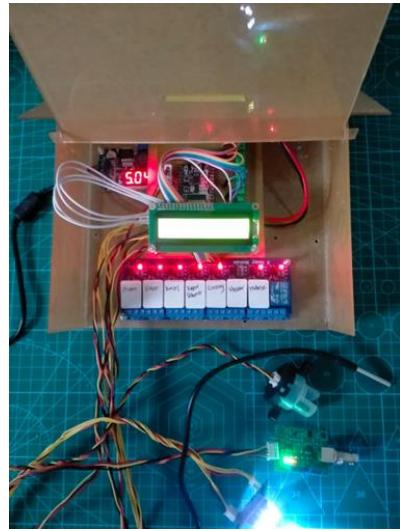


Gambar 2 Diagram alir utama sistem kolam cerdas

2.3 Perangkat Keras

Untuk mendukung *flowchart* program pada gambar 2, pada penelitian ini dibuat prangkat keras dengan diagram seperti pada gambar 1. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sensor, mikrokontroler, aktuator, serta sistem komunikasi data. Mikrokontroler yang digunakan adalah ESP32 dual-core, yang memungkinkan pemrosesan data sensor dan kendali aktuator secara simultan untuk meningkatkan efisiensi sistem. Sistem perangkat keras terdiri dari sensor DS18B20 untuk mengukur suhu air, sensor pH4502C untuk mendeteksi tingkat keasaman air, serta sensor turbidity untuk mengukur tingkat kekeruhan air. Selain itu, digunakan sensor TCS3200 sebagai pendekripsi kadar amonia berdasarkan perubahan warna kertas uji amonia. Data yang diperoleh dari sensor dikirimkan ke mikrokontroler untuk diolah dan dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan sistem kendali. Perangkat keras yang

terdiri dari sistem sensor, pemroses, aktuator, dan kotak pelindung dibuat dan dirakit menjadi satu seperti pada gambar 3.



Gambar 3 Perangkat keras sistem kolam cerdas

Setelah selesai perakitan perangkat keras diuji dengan menggunakan program tiruan untuk menguji apakah rangkaian dapat bekerja dan sesuai dengan rancangannya atau belum, jika belum maka akan dilakukan perbaikan. Jika sudah maka akan diterapkan program asli dan diuji.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

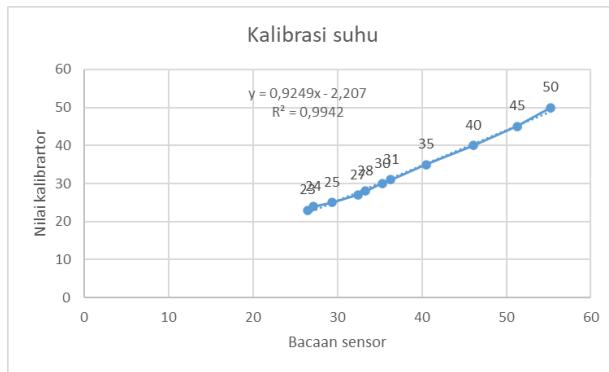
Sebelum diterapkan pada sistem utama, sensor diuji terlebih dahulu pembacaannya. Apabila terdapat error pada bacaan dilakukan kalibrasi pada program baca sensor. Pengujian dimulai dengan membaca nilai sensor dengan program baca sensor dan dibandingkan dengan kalibratornya seperti pada gambar 4, 6, 9, dan 10. Setelah itu, data nilai kalibrator dan nilai bacaan sensor diolah untuk didapatkan nilai regresi linier yang merupakan nilai atau rumus kalibrasi sensor-sensor seperti pada gambar 5, 7, 8, dan 11.

Sensor DS18B20 dikalibrasi dengan menggunakan kalibrator berupa termometer alkohol dan dilakukan variasi suhu air menggunakan panci listrik seperti pada gambar 4. Tegangan operasi sensor yang digunakan saat kalibrasi adalah 3.4V.

Hasil pengujian sensor dapat dilihat pada gambar 5 dengan bagian horizontal (sumbu x) adalah nilai bacaan sensor dan pada bagian vertikal (sumbu y) adalah nilai suhu yang terbaca pada termometer alkohol. Dari kedua data tersebut diperoleh nilai kalibrasi yaitu $Y=0,9249 x$ (nilai bacaan sensor) – 2,207, dimana nilai kalibrasi ini diterapkan pada program bacaan terkalibrasi pada program utama.



Gambar 4 Kalibrasi sensor DS18B20

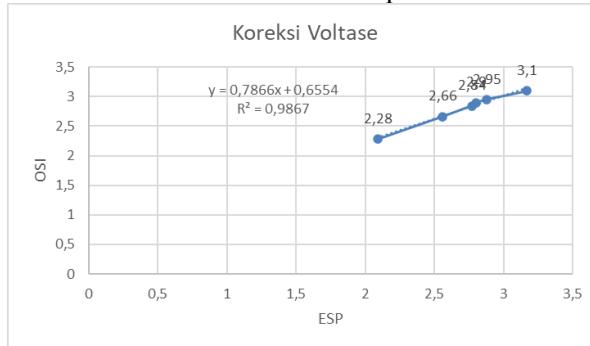


Gambar 5 Hasil dan nilai kalibrasi sensor suhu

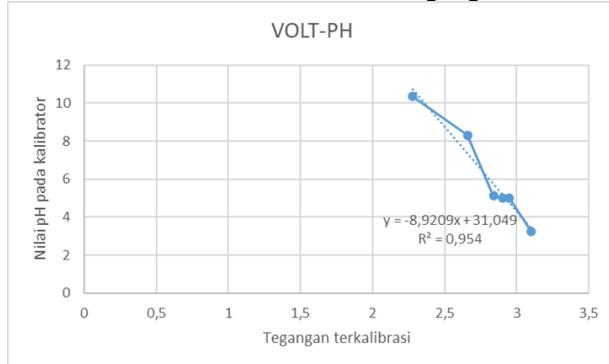
Sensor PH4502C dikalibrasi dengan menggunakan kalibrator berupa pH meter terkalibrasi dan dilakukan variasi pH air menggunakan buffer pH dengan nilai asam, netral, dan basa seperti pada gambar 6. Sebelum membaca nilai pH, dilakukan pengecekan hasil bacaan tegangan dari sensor PH4502C berupa tegangan DC dan nilainya dikalibrasi seperti pada gambar 7. Selanjutnya dilakukan proses pembandingan nilai bacaan sensor pH dengan kalibratornya dan diperoleh rumus kalibrasi $Y = -8,9209 x + 31,049$ seperti pada gambar 8, dimana nilai kalibrasi ini diterapkan pada program bacaan terkalibrasi pada program utama.



Gambar 6 Kalibrasi sensor pH PH4502C

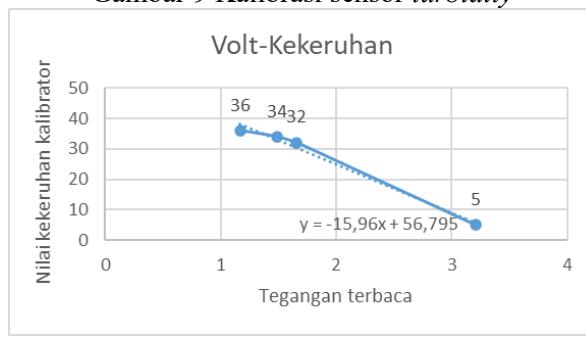


Gambar 7 Hasil dan nilai kalibrasi bacaan tegangan ESP32 sensor pH



Gambar 8 Hasil konversi nilai tegangan ke nilai pH

Sensor analog turbidity dikalibrasi dengan cara memasukkan sensor ke dalam kolam seperti pada gambar 9 kemudian nilai bacaannya dibandingkan dengan nilai kalibratornya yang berupa imhoff cone seperti pada gambar 9. Variasi kekeruhan dilakukan dengan mengambil sample air pada 4 kolam berbeda. Hasil dari pengambilan data dari kalibrator dan nilai bacaan sensor berupa tegangan diolah dan diperoleh nilai kalibrasi sensor $Y = -15,96 x + 56,795$ seperti pada gambar 10.

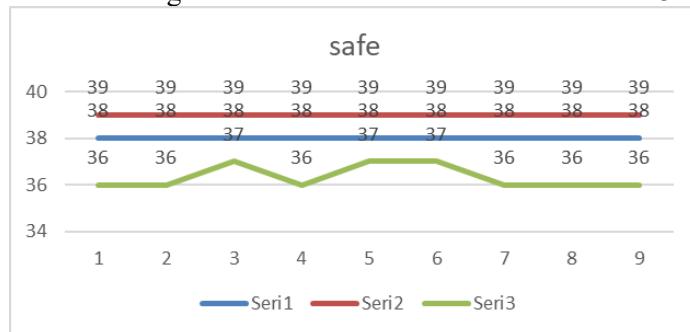
Gambar 9 Kalibrasi sensor *turbidity*

Gambar 10 Hasil konversi nilai tegangan ke nilai kekeruhan

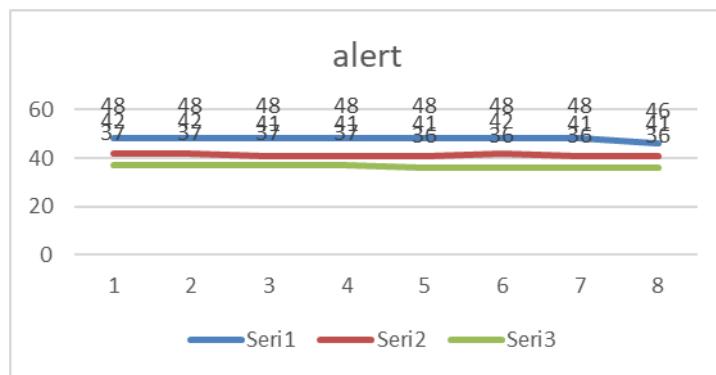
Pengujian program baca sensor amonia buatan (sensor TCS3200) dilakukan dengan mengambil data frekuensi RGB (Red – Green – Blue) dari warna-warna status kadar amonia pada kertas penguji amonia dengan cara membaca frekuensinya satu per satu seperti pada gambar 11. Data frekuensi RGB yang diperoleh diolah menjadi grafik-grafik seperti pada gambar 12 sampai gambar 15.



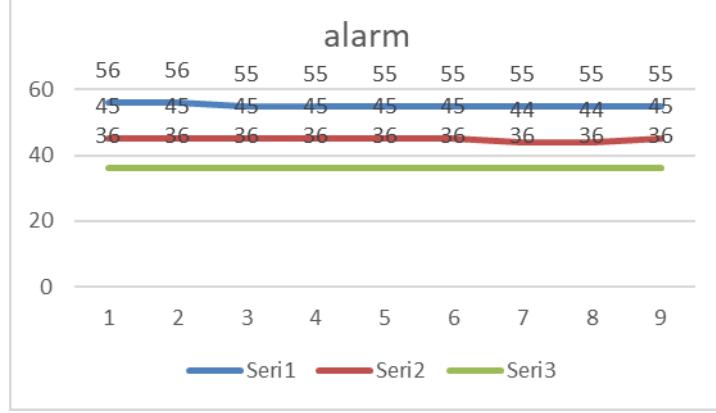
Gambar 11 Pengambilan data frekuensi RGB sensor TCS3200



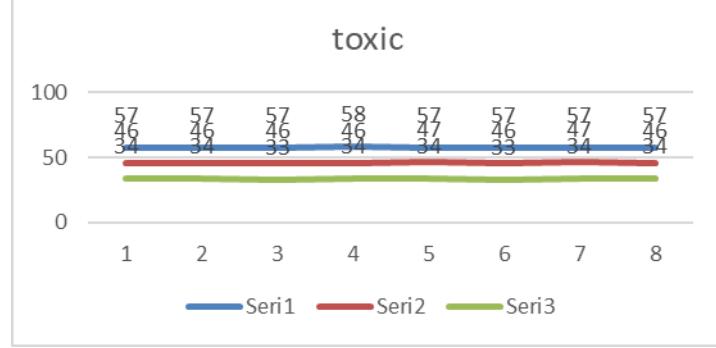
Gambar 12 Grafik frekuensi RGB dari status amonia aman



Gambar 13 Grafik frekuensi RGB dari status amonia peringatan



Gambar 14 Grafik frekuensi RGB dari status amonia alarm



Gambar 15 Grafik frekuensi RGB dari status amonia toxic

Berdasarkan grafik yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa perbedaan frekuensi RGB dari setiap warna status amonia tidak berbeda jauh. Hal ini membuat sensor sulit untuk ditetapkan rumusan kalibrasinya. Untuk dapat mengkalibrasinya perlu data set yang lebih banyak dengan pengujian yang bervariasi kecerahan lingkungannya untuk dapat dipastikan perbedaan frekuensi RGB yang dimiliki setiap status amonia. Untuk dapat memenuhi tujuan penelitian ini, sementara inputan dan status amonia direkayasa dengan menggunakan warna RGB.

Selanjutnya dilakukan pengujian program Fuzzy Sugeno dengan mensimulasikannya menggunakan inputan sampel pada setiap rentang kelasnya. Seperti pada gambar 16 dimana dilakukan pengujian program Fuzzy Sugeno untuk parameter pH air.

```

Output  Serial Monitor ×
Message (Enter to send message to 'DOIT ESP32 DEVKIT V1' on 'COM3')

load:0x40080400,len:4
load:0x40080404,len:3196
entry 0x400805a4
Testing pH: 5.00 | Output kelasph: -100.00
Testing pH: 6.00 | Output kelasph: -100.00
Testing pH: 6.20 | Output kelasph: -66.67
Testing pH: 6.40 | Output kelasph: -33.33
Testing pH: 6.60 | Output kelasph: 0.00
Testing pH: 7.00 | Output kelasph: 0.00
Testing pH: 7.80 | Output kelasph: 0.00
Testing pH: 8.00 | Output kelasph: 28.57
Testing pH: 8.50 | Output kelasph: 100.00
Testing pH: 9.00 | Output kelasph: 100.00
  
```

Gambar 16 Hasil pengujian program Fuzzy Sugeno

Berdasarkan hasil uji coba program Fuzzy Sugeno pada parameter suhu, pH, kekeruhan, dan amonia, sistem telah mampu mengklasifikasikan setiap nilai input sesuai dengan keanggotaan fuzzy yang telah ditetapkan. Setiap parameter menunjukkan perubahan keluaran yang sesuai dengan aturan fuzzy yang diterapkan. Untuk membuktikan bahwa hasil program sesuai dengan teori Fuzzy Sugeno, kita dapat menggunakan rumus defuzzifikasi metode rata-rata tertimbang, yang didefinisikan sebagai:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

di mana:

y^* adalah nilai keluaran defuzzifikasi,
 w_i adalah derajat keanggotaan dari aturan fuzzy ke- i ,
 z_i adalah konsekuensi dari aturan fuzzy ke- i .

Sebagai contoh, dalam pengujian parameter pH, untuk $pH=6.4$ $pH = 6.4$, himpunan fuzzy memiliki derajat keanggotaan:

Asam: $\mu_{\text{asam}} = 6.6-6.4 / 6.6-6.0 = 0.2 / 0.6 = 0.33$

Netral: $\mu_{\text{netral}} = 6.4-6.0 / 6.6-6.0 = 0.4 / 0.6 = 0.67$

Jika konsekuensi dari aturan Fuzzy Sugeno untuk kondisi ini adalah:

Asam: $z_1 = -100$

Netral: $z_2 = 0$

Maka keluaran defuzzifikasi dihitung sebagai:

$$y^* = (0.33 \times -100) + (0.67 \times 0) / 0.33 + 0.67$$

$$y^* = (-33.33 + 0) / 1 = -33.33$$

Hasil ini sesuai dengan output program yang menampilkan kelas $pH = -33.33$ untuk nilai $pH 6.4$ (Gambar 16). Perhitungan serupa juga dapat diterapkan untuk suhu, kekeruhan, dan amonia, menunjukkan bahwa sistem fuzzy bekerja dengan benar berdasarkan teori yang diterapkan. Dengan demikian, pengujian ini membuktikan bahwa algoritma Fuzzy Sugeno yang digunakan telah sesuai dengan metode matematisnya dan dapat digunakan sebagai model klasifikasi parameter kualitas air pada sistem bioflok.

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan menguji respon relay aktuator terhadap kombinasi inputan dari fuzzy output dari setiap parameter dengan hasil seperti pada tabel 1.

Tabel 1 Hasil uji respon aktuator terhadap nilai parameter kualitas air

No	Kondisi Uji	Parameter Uji	Status Aktuator
1	Normal	Suhu: 27°C, pH: 7.0, Kekeruhan: 40 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Tidak Aktif
2	Suhu Dingin	Suhu: 23°C, pH: 7.0, Kekeruhan: 40 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Pemanas Aktif

3	Suhu Panas	Suhu: 32°C, pH: 7.0, Kekeruhan: 40 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Cooling System Aktif
4	pH Basa & Amonia Tinggi	Suhu: 27°C, pH: 8.5, Kekeruhan: 40 ppm, Amonia: 0.5 ppm	Pompa Probiotik Aktif
5	pH Basa, Amonia Normal, Kekeruhan Tinggi	Suhu: 27°C, pH: 8.0, Kekeruhan: 60 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Pompa Filter Aktif
6	pH Basa, Amonia Normal, Kekeruhan Normal	Suhu: 27°C, pH: 8.0, Kekeruhan: 40 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Pompa Molase Aktif
7	pH Asam & Kekeruhan Tinggi	Suhu: 27°C, pH: 6.2, Kekeruhan: 70 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Pompa Kapur Dolomit Aktif
8	pH Asam & Kekeruhan Rendah	Suhu: 27°C, pH: 6.2, Kekeruhan: 30 ppm, Amonia: 0.1 ppm	Tidak Aktif

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem kendali kualitas air kolam berbasis Fuzzy Sugeno dengan implementasi pada mikrokontroler dual-core ESP32. Sistem yang dirancang mampu memonitor dan mengendalikan parameter suhu, pH, dan kekeruhan air secara otomatis dan real-time dengan memberikan output pengendalian nyala aktuator menggunakan Fuzzy Sugeno. Selain itu, sistem kendali juga dapat membuat keputusan dengan logika pengambilan keputusan yang sudah mempertimbangkan pengaruh satu parameter dengan parameter kualitas air lainnya, dimana hal ini diperoleh dari wawancara dengan pelaku budidaya nilai sistem bioflok dan didukung beberapa jurnal referensi terkait kolam bioflok.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan metode Fuzzy Sugeno memberikan respons kendali yang lebih presisi dibandingkan dengan sistem manual. Pemanfaatan fitur dual-core pada ESP32 memungkinkan pemrosesan data sensor dan eksekusi kendali berjalan lebih efisien dan mendukung logika pengambilan keputusan yang dirancang, yaitu proses pengendalian suhu atau temperature air kolam berjalan secara paralel atau berbarengan dengan pengendalian parameter lainnya seperti pH, kekeruhan, dan amonia yang saling terkait satu sama lain.

5. SARAN

Meskipun sistem kendali telah berfungsi sesuai dengan rancangan, sensor amonia buatan yang dikembangkan, yaitu kombinasi sensor warna TCS3200 dengan kertas uji amonia, masih memerlukan pengembangan lebih lanjut karena belum mampu mendeteksi amonia secara aktual dengan akurasi yang diharapkan. Selain itu, dari aspek teknis, sistem ini masih dapat ditingkatkan dengan pengelolaan pengkabelan yang lebih rapi agar memudahkan perawatan dan mengurangi risiko gangguan operasional.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Badan Pusat Statistik, "Statistik Perikanan Indonesia 2024," Jakarta: BPS, 2024.

- [2] Badan Pusat Statistik, "Harga Ikan Air Tawar Hasil Budidaya 2018-2022," Jakarta: BPS, 2022.
- [3] Kementerian Kelautan dan Perikanan, "Produksi Perikanan Budidaya 2019-2023," Jakarta: KKP, 2024.
- [4] A. Abid, B. Santoso, and C. D. Nugroho, "IoT-based water quality monitoring system," in Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Tech., 2024, pp. 45-50.
- [5] M. Shafkat and S. Islam, "Fuzzy logic-based water quality control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 69, no. 3, pp. 1234-1245, 2023.
- [6] R. Podder, T. N. Ahmed, and F. Rahman, "Microbial ecology in biofloc technology," Aquaculture Reports, vol. 27, pp. 12-23, 2023.
- [7] H. Saridu, W. Kusuma, and R. Permana, "Biofloc as natural fish feed: A review," Journal of Aquatic Science and Technology, vol. 15, no. 1, pp. 35-45, 2023.
- [8] A. Abdurohman, F. Setiawan, and D. H. Wijaya, "Automated water quality monitoring in aquaculture," IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 8, pp. 5678-5689, 2022.
- [9] M. Bakhit, T. Yamada, and K. Fujita, "Real-time biofloc monitoring using IoT sensors," Journal of Aquaculture Engineering, vol. 30, no. 4, pp. 89-102, 2022.
- [10] A. Hidayat, S. Permana, and D. R. Yusuf, "Fuzzy Mamdani for water quality assessment in aquaculture," IEEE Access, vol. 12, pp. 789-800, 2024.
- [11] A. Abid, C. D. Nugroho, and R. Santoso, "Ammonia detection in biofloc systems using MQ135 and MQ7 sensors," Environmental Monitoring and Assessment, vol. 195, no. 4, pp. 245-260, 2024.