

## Pengembangan Sistem Pemantauan Kualitas Air Akuakultur Berbasis IoT Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani

Sefrani IG Siregar<sup>1</sup>, Hesti Wahyu Handani<sup>2\*</sup>, Christio Revano Mege<sup>3</sup>, Nike Dwi Grevika Drantantiyas<sup>4</sup>, Septia Eka Marsha Putra<sup>5</sup>, Ahmad Suaif<sup>6</sup>, Listra Yehezkiel Ginting<sup>7</sup>, Amrina Mustaqim<sup>8</sup>, Friska Hasugian<sup>9</sup>, Rozi Afdi<sup>10</sup>

<sup>1-8</sup>Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

<sup>9,10</sup>Rekayasa Minyak dan Gas, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

<sup>1-8</sup>tf@itera.ac.id, <sup>9,10</sup>rmg@itera.ac.id

### Abstract

*The aquaculture industry requires precise environmental management to ensure the health of aquatic biota. Conventional monitoring methods often suffer from manual sampling delays, leading to late mitigation of environmental changes. This research aims to develop an Internet of Things (IoT)-based water quality monitoring system for aquaculture applications. The system integrates pH, Total Dissolved Solids (TDS), and turbidity sensors with a microcontroller, connected to a mobile application designed via MIT App Inventor. Calibration testing of three sensors on 30 samples showed accuracy >90%. The defuzzification test on 12 rules yielded a MAPE of 0.33%. Experimental results demonstrate that the system accurately measures and transmits parameters, such as a turbidity of 46 NTU, TDS of 174 ppm, and pH of 7.67, resulting in an automated "Good" quality classification. Performance tests show high efficiency with an average data transmission delay of only 2 seconds. Testing on aquaculture ponds conducted for 6 hours showed that the system was able to read and provide accurate water quality conclusions according to the fuzzy rules created. In conclusion, this IoT system provides a reliable, cost-effective solution for remote monitoring, significantly reducing the risks of manual observation while enhancing the productivity and sustainability of aquaculture management through digital transformation.*

*Keywords: Aquaculture, Internet of Things, Water Quality, Real-time Monitoring, MIT App Inventor.*

### Abstrak

Industri akuakultur membutuhkan manajemen lingkungan yang tepat untuk memastikan kesehatan biota perairan. Metode pemantauan konvensional seringkali mengalami keterlambatan pengambilan sampel manual, yang menyebabkan mitigasi perubahan lingkungan yang terlambat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) untuk aplikasi akuakultur. Sistem ini mengintegrasikan sensor pH, Total Dissolved Solids (TDS), dan kekeruhan dengan mikrokontroler, yang terhubung ke aplikasi seluler yang dirancang melalui MIT App Inventor. Pengujian hasil kalibrasi tiga sensor pada 30 sampel menunjukkan akurasi >90%. Proses pengujian defuzzifikasi pada 12 aturan mendapatkan MAPE 0,33%. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem secara akurat mengukur dan mengirimkan parameter, seperti kekeruhan 46 NTU, TDS 174 ppm, dan pH 7,67, menghasilkan klasifikasi kualitas "Baik" secara otomatis. Uji kinerja menunjukkan efisiensi tinggi dengan penundaan transmisi data rata-rata hanya 2 detik. Pengujian pada kolam akuakultur yang dilakukan selama 6 jam menunjukkan bahwa sistem mampu membaca dan memberikan Kesimpulan kualitas air secara akurat sesuai dengan aturan fuzzy yang dibuat. Kesimpulannya, sistem IoT ini menyediakan solusi yang andal dan hemat biaya untuk pemantauan jarak jauh, secara signifikan mengurangi risiko pengamatan manual sekaligus meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pengelolaan akuakultur melalui transformasi digital.

Kata kunci: Akuakultur, Internet of Things, Kualitas Air, Pemantauan Real-time, MIT App Inventor.



## 1. Pendahuluan

Sektor akuakultur telah menjadi pilar utama dalam memenuhi kebutuhan protein hewani global di tengah stagnasi hasil perikanan tangkap. Keberhasilan produksi dalam budidaya perairan sangat bergantung pada stabilitas lingkungan hidup biota, di mana kualitas air menjadi faktor pembatas utama yang menentukan laju pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup [1], [2]. Perubahan mendadak pada parameter fisik dan kimia air dapat memicu stres pada organisme budidaya, menurunkan sistem imun, hingga menyebabkan kematian massal yang berdampak pada kerugian ekonomi signifikan bagi pembudidaya [3], [4].

Parameter krusial seperti derajat keasaman (pH), total padatan terlarut (TDS), dan tingkat kekeruhan (turbiditas) merupakan indikator kesehatan ekosistem tambak yang saling berinteraksi. Tingkat pH yang tidak stabil dapat mengganggu proses metabolisme ikan, sementara kekeruhan yang tinggi akibat akumulasi sisa pakan dan feses dapat menghambat penetrasi cahaya serta menurunkan kadar oksigen terlarut [5], [6]. Sayangnya, banyak pembudidaya masih mengandalkan pengamatan visual atau pemeriksaan manual yang bersifat periodik, sehingga fluktuasi parameter yang berbahaya sering kali terlambat terdeteksi [7].

Kelemahan pemantauan konvensional yang tidak kontinu menciptakan celah risiko dalam manajemen budidaya intensif. Pengujian laboratorium tradisional memerlukan waktu tunggu yang lama, sementara kondisi air dalam tambak dapat berubah dalam hitungan jam akibat cuaca atau aktivitas biologis [8]. Oleh karena itu, diperlukan transformasi menuju sistem pemantauan otomatis yang mampu memberikan data secara berkelanjutan dan akurat guna mendukung langkah mitigasi yang presisi dan cepat sebelum kondisi air mencapai ambang batas kritis [9].

Implementasi teknologi Internet of Things (IoT) menjadi solusi mutakhir untuk menciptakan ekosistem akuakultur cerdas (smart aquaculture). Dengan mengintegrasikan jaringan sensor nirkabel, data mengenai kondisi air dapat ditransmisikan secara real-time ke perangkat pintar pengguna [10], [11]. Teknologi ini memungkinkan pengawasan jarak jauh yang efisien, mengurangi biaya operasional tenaga kerja, dan memberikan peringatan dini (early warning system) yang sangat krusial bagi manajemen risiko di sektor budidaya modern [12], [13].

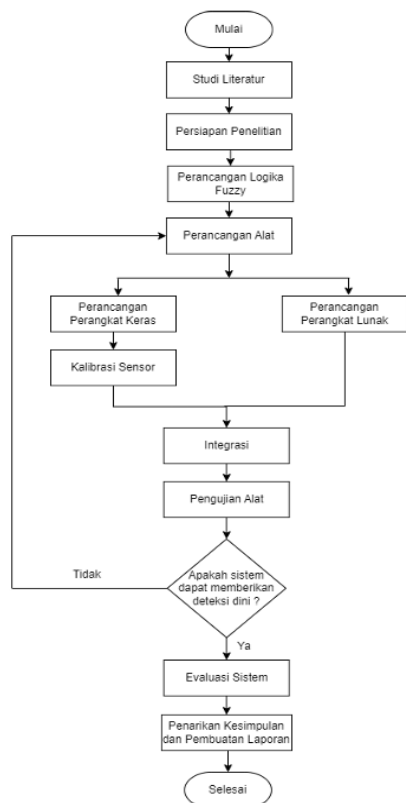
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas air akuakultur berbasis IoT yang terintegrasi dengan aplikasi Android melalui platform MIT App Inventor. Sistem ini dirancang untuk memantau parameter pH, TDS, dan turbiditas secara simultan, serta memberikan klasifikasi kelayakan air untuk budidaya secara otomatis menggunakan logika *fuzzy* Mamdani. Melalui penerapan sistem ini, diharapkan efisiensi produksi akuakultur dapat ditingkatkan melalui penyediaan data yang transparan dan real-time, sehingga keberlanjutan usaha budidaya dapat lebih terjamin di masa depan.

## 2. Metode Penelitian

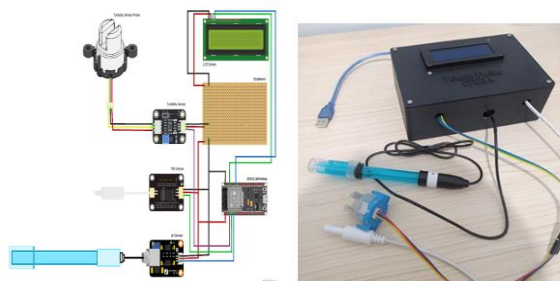
Metode penelitian ini dilakukan dengan pendekatan sistematis yang mencakup beberapa tahapan utama, mulai dari perancangan perangkat keras (hardware), pengembangan perangkat lunak (software), hingga integrasi adalah berbasis IoT seperti terlihat pada Gambar 1. Tujuan utamanya adalah menciptakan alat yang mampu memantau parameter krusial kualitas air secara real-time untuk mendukung budidaya ikan nila. Langkah awal dimulai dengan studi literatur untuk menentukan standar kelayakan air, diikuti dengan persiapan alat seperti kolam terpal diameter 1m dan tinggi 1 m serta pembenihan 100 ekor ikan sebagai objek pengujian.

Pada tahap perancangan perangkat keras, mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai otak utama sistem karena kemampuannya dalam memproses data dan konektivitas nirkabelnya. ESP32 dihubungkan dengan tiga sensor elektronik, yakni sensor pH SKU SEN0161, sensor TDS SKU SEN0244, dan sensor kekeruhan SKU SEN0189. Seluruh komponen ini dilindungi oleh casing hasil cetak 3D berbahan Polylactic Acid (PLA) yang dirancang dengan dimensi presisi dan ketebalan 2 mm agar tahan terhadap kondisi lingkungan kolam seperti terlihat pada Gambar 2.

Teknik kalibrasi menjadi bagian krusial dalam metode ini untuk memastikan akurasi data sensor sebelum digunakan dalam sistem. Pengujian dilakukan terhadap 30 sampel data untuk membandingkan pembacaan sensor dengan alat ukur standar digital.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

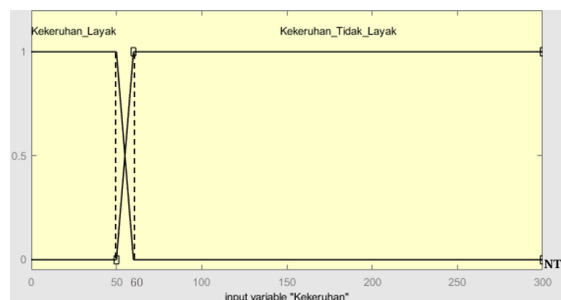


Gambar 2. Rangkaian Sistem dan Rancangan Alat

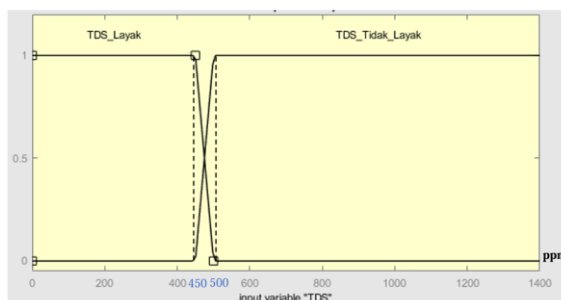
Metode pengolahan data ini menggunakan Logika Fuzzy Mamdani untuk menentukan status kualitas air berdasarkan input sensor. Algoritma ini membagi variabel input menjadi beberapa kategori, seperti "Layak" dan "Tidak Layak", dengan rentang nilai spesifik untuk pH (6,5–8,5), TDS (0–500 ppm), dan kekeruhan (0–60 NTU). Logika ini memproses data melalui fungsi implikasi MIN dan komposisi aturan MAX untuk menghasilkan keputusan yang akurat.

Penelitian ini menggunakan 12 aturan (rules) fuzzy yang telah disusun untuk mengklasifikasikan kondisi air menjadi tiga status, yaitu "Baik", "Cukup", atau "Buruk" seperti terlihat pada tabel 1. Untuk mendapatkan hasil akhir yang dapat diproses secara digital, sistem menggunakan metode defuzzifikasi Centroid. Hasil dari defuzzifikasi inilah yang menjadi indikator utama bagi pembudidaya untuk

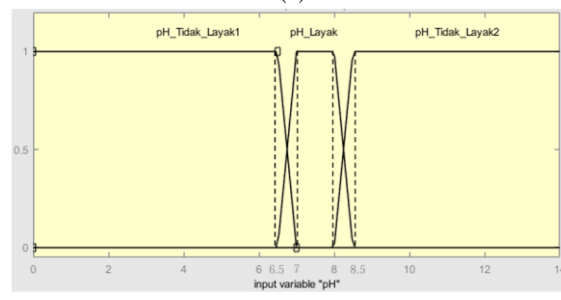
mengetahui apakah air kolam masih dalam kondisi yang direkomendasikan atau membutuhkan penanganan segera.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3 Fungsi Keanggotaan (a) kekeruhan, (b) TDS, (c) pH

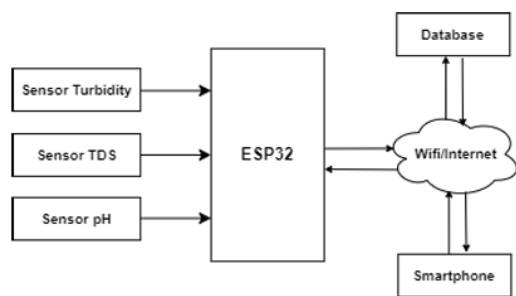
Tabel 1. Komposisi Aturan Fuzzy

Aturan	Kekeruhan	TDS	pH	Output
1	Layak	Layak	Tidak Layak 1	Cukup
2	Tidak Layak	Layak	Tidak Layak 1	Buruk
3	Layak	Tidak Layak	Tidak Layak 1	Buruk
4	Tidak Layak	Tidak Layak	Tidak Layak 1	Buruk
5	Layak	Layak	Layak	Baik
6	Tidak Layak	Layak	Layak	Cukup
7	Layak	Tidak Layak	Layak	Cukup
8	Tidak Layak	Tidak Layak	Layak	Buruk
9	Layak	Layak	Tidak Layak 2	Cukup
10	Tidak Layak	Layak	Tidak Layak 2	Buruk
11	Layak	Tidak Layak	Tidak Layak 2	Buruk

		Layak	Layak 2	
12	Tidak Layak	Tidak Layak	Tidak Layak 2	Buruk

Dari sisi perangkat lunak dan konektivitas, sistem ini menerapkan konsep Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan Firebase sebagai basis data real-time. Data hasil pemrosesan ESP32 dikirimkan secara nirkabel melalui WiFi untuk disimpan di Firebase, yang kemudian disinkronkan ke aplikasi smartphone. Penggunaan Firebase menjamin bahwa riwayat data pengukuran dapat diakses kapan saja oleh pengguna melalui koneksi internet. Sistem dirancang untuk mampu menghasilkan kesimpulan kualitas air berdasarkan logika fuzzy yang dibuat dalam waktu 1 menit. Hal ini disebabkan respon sensor kekeruhan, TDS, dan pH membutuhkan waktu sekitar 1 menit untuk membaca nilai yang stabil untuk dikirimkan ke mikrokontroler, sedangkan untuk proses defuzzifikasi dan transmisi data ke aplikasi hanya membutuhkan waktu sekitar 2 detik.

Antarmuka pengguna dikembangkan menggunakan platform MIT App Inventor untuk memudahkan pembudidaya dalam memantau kondisi kolam. Aplikasi ini menampilkan data numerik dari sensor pH, TDS, dan kekeruhan secara visual, lengkap dengan status kualitas air hasil perhitungan logika fuzzy dengan arsitektur sistem IoT seperti terlihat pada Gambar 4. Dengan demikian, metode ini tidak hanya fokus pada akurasi pengukuran, tetapi juga pada kemudahan akses informasi bagi pengguna akhir melalui perangkat seluler.



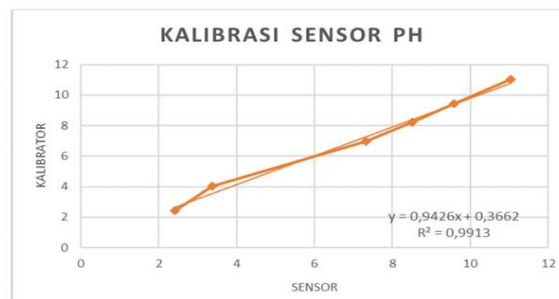
Gambar 4. Arsitektur Sistem

Tahap akhir penelitian adalah evaluasi sistem melalui pengujian berkelanjutan selama 6 jam dengan pengambilan data setiap 10 menit. Akurasi algoritma divalidasi dengan membandingkan hasil defuzzifikasi alat terhadap simulasi software Matlab.

### 3. Hasil dan Pembahasan

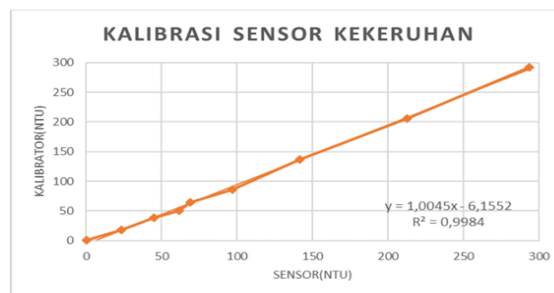
Proses kalibrasi sensor pH dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor SKU SEN0161 terhadap alat ukur standar berupa pH meter digital melalui pengambilan 30 sampel data. Hasil analisis statistik menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara nilai sensor dengan alat standar, yang

dinyatakan dalam persamaan regresi seperti pada Gambar 5. Tingkat akurasi yang dihasilkan sangat memuaskan, yakni mencapai nilai koefisien determinasi  $R^2$  sebesar 0,99 yang menandakan bahwa sensor memiliki presisi tinggi dalam mendeteksi tingkat keasaman air secara konsisten.

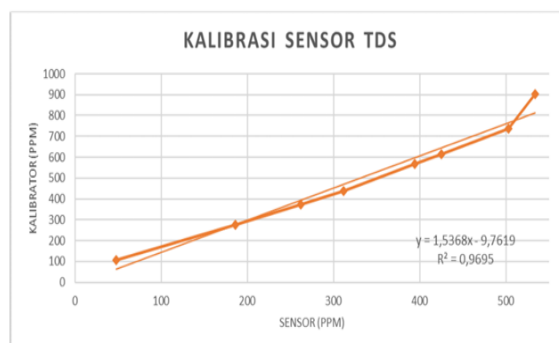


Gambar 5. Kalibrasi Sensor pH

Selain sensor pH, kalibrasi juga diterapkan pada sensor kekeruhan (turbiditas) SKU SEN0189 dan sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) SKU SEN0244 untuk memastikan validitas data input bagi sistem seperti terlihat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Pengujian dilakukan dengan menempatkan probe sensor di posisi strategis, yaitu di tengah kolam, untuk mendapatkan representasi data yang paling akurat dari kondisi air yang sebenarnya. Seluruh sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP32 ini menunjukkan koefisien determinasi di atas 0,96 sehingga perangkat mampu memberikan informasi yang valid mengenai parameter kelayakan air, baik dalam kategori "Layak" maupun "Tidak Layak".



Gambar 6. Kalibrasi Sensor kekeruhan



Gambar 7. Kalibrasi Sensor TDS

Evaluasi menyeluruh terhadap sistem ini menunjukkan bahwa hasil kalibrasi tersebut berdampak positif pada performa algoritma logika fuzzy Mamdani dalam mengambil keputusan. Integrasi antara perangkat keras yang terkalibrasi dengan pengolahan data berbasis IoT menghasilkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang sangat rendah, yaitu hanya sebesar 0,33%.

Evaluasi algoritma Fuzzy Mamdani dilakukan untuk memastikan sistem mampu mengambil keputusan yang presisi berdasarkan data yang diterima dari sensor turbidity, TDS, dan pH. Sebanyak 12 aturan logika fuzzy diuji untuk mengklasifikasikan kondisi air ke dalam status "baik", "cukup", atau "buruk" melalui proses defuzzifikasi. Agar validitas sistem terjamin, setiap nilai output yang dihasilkan oleh perangkat dibandingkan secara langsung dengan hasil simulasi pada software Matlab seperti terlihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pengujian output defuzzifikasi berdasarkan 12 aturan

Aturan	Defuzzifikasi Sistem	Defuzzifikasi Matlab	Selisih Absolut	APE
1	Cukup (50)	Cukup (50)	0	0
2	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
3	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
4	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
5	Baik (17,62)	Baik (17,4)	0,22	1,26
6	Cukup (50)	Cukup (50)	0	0
7	Cukup (50)	Cukup (50)	0	0
8	Buruk (81,79)	Buruk (82,2)	0,41	0,49
9	Cukup (50)	Cukup (50)	0	0
10	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
11	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
12	Buruk (82,38)	Buruk (82,6)	0,22	0,26
<b>MAPE</b>				<b>0,33</b>

Proses pengujian dilakukan dengan mengambil 12 sampel data untuk setiap aturan selama durasi satu menit guna mendapatkan nilai rata-rata yang stabil. Berdasarkan perbandingan tersebut, nilai *Absolute Percentage Error* (APE) terkecil sebesar 0% ditemukan pada aturan 1, 6, 7, dan 9, sementara tingkat kesalahan tertinggi hanya mencapai 1,26% pada aturan ke-5. Hasil ini menunjukkan bahwa deviasi antara perhitungan sistem fisik dengan simulasi komputer sangatlah tipis.

Secara keseluruhan, sistem ini mencatatkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,33%. Mengingat nilai MAPE tersebut jauh di bawah standar maksimal 10%, dapat disimpulkan bahwa algoritma yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi. Dengan demikian, sistem ini dinyatakan sangat andal dan efektif dalam menentukan kualitas air kolam ikan nila secara *real-time*.

Pengujian perangkat lunak dilakukan menggunakan aplikasi Android berbasis blok pemrograman visual

yang dirancang melalui MIT App Inventor, seperti terlihat pada gambar 6. Setelah diinstal pada smartphone, aplikasi ini berfungsi sebagai alat monitoring kualitas air dengan menampilkan data sensor secara real-time, meliputi parameter kekeruhan (TUR), TDS, dan pH, serta memberikan klasifikasi kualitas air dalam kategori baik, cukup, atau buruk seperti terlihat pada Gambar 6. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan sampel air, aplikasi berhasil menampilkan visualisasi data secara akurat, di mana nilai kekeruhan sebesar 46 NTU, TDS 174 ppm, dan pH 7,67 menghasilkan kesimpulan bahwa kondisi air berada dalam rentang kualitas yang baik.



Gambar 6. Tampilan pada aplikasi smartphone

Pengujian pengiriman data berbasis *Internet of Things (IoT)* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dan mengukur latensi pengiriman data dari perangkat pemantauan ke aplikasi menggunakan jaringan internet seperti terlihat pada Tabel 3. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali pada waktu yang berbeda untuk memastikan konsistensi performa. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata jeda waktu pengiriman data hanya sebesar 2 detik, yang mengindikasikan bahwa sistem memiliki efisiensi transmisi yang tinggi dan mampu menyajikan informasi kualitas air secara cepat serta *real-time* kepada pengguna.

Tabel 3. Pengujian pengiriman data Internet of Things

Percobaan Ke-	Waktu Terbaca pada Sistem	Waktu Terbaca pada Aplikasi	Delay(s)
1	13:54:23 WIB	13:54:25 WIB	2
2	13:59:26 WIB	13:59:28 WIB	2
3	14:04:28 WIB	14:04:30 WIB	2
4	14:09:30 WIB	14:09:32 WIB	2
5	14:14:33 WIB	14:14:35 WIB	2
<b>Rata-Rata</b>			<b>2</b>

Tabel 4 menyajikan data pemantauan kualitas air kolam ikan nila yang dilakukan secara berkala setiap 10 menit selama rentang waktu 6 jam. Observasi rutin ini krusial untuk menjaga agar parameter

kekeruhan, TDS, dan pH tetap berada dalam standar ideal budidaya, yakni kekeruhan antara 0 – 60 NTU, TDS sebesar 20 – 500 ppm, serta tingkat pH di angka 6,5 – 8,5. Konsistensi parameter dalam batas-batas tersebut menjadi penentu utama keberhasilan ekosistem kolam.

Tabel 4. Data pengukuran kualitas air pada kolam akuakultur

Menit ke-	Pukul	Kekeruhan	TDS	pH	Kualitas Air
1	14:20	-159	260	7,51	Baik
10	14:30	-156	260	7,53	Baik
20	14:40	-192	263	7,97	Baik
30	14:50	-1021	263	8,25	Baik
40	15:00	-895	263	8,24	Baik
50	15:10	-860	266	8,31	Cukup
60	15:20	-477	263	8,42	Cukup
70	15:30	-431	263	7,56	Baik
80	15:40	-580	266	8,37	Cukup
90	15:50	-486	263	8,43	Cukup
100	16:00	-438	266	8,39	Cukup
110	16:10	-358	263	8,34	Cukup
120	16:20	-164	205	8,5	Cukup
130	16:30	-217	200	7,74	Baik
140	16:40	-174	194	8,48	Cukup
150	16:50	-116	191	8,44	Cukup
160	17:00	-85	182	7,73	Baik
170	17:10	-57	173	7,64	Baik
180	17:20	-22	262	7,82	Baik
190	17:30	-19	163	8,25	Baik
200	17:40	7	154	8,52	Cukup
210	17:50	32	154	7,66	Baik
220	18:00	28	151	8,51	Cukup
230	18:10	43	234	8,45	Cukup
240	18:20	46	234	8,5	Cukup
250	18:30	44	234	7,73	Baik
260	18:40	31	231	7,73	Baik
270	18:50	47	229	8,44	Cukup
280	19:00	40	234	7,71	Baik
290	19:10	44	266	7,73	Baik
300	19:20	43	263	8,5	Cukup
310	19:30	47	265	7,55	Baik
320	19:40	53	268	7,7	Cukup
330	19:50	47	271	8,12	Baik
340	20:00	47	220	8,45	Cukup
350	20:10	53	184	7,66	Cukup
360	20:20	46	185	7,62	Baik

Selama pengamatan dari menit ke-1 hingga ke-190 (pukul 14.20 – 17.30 WIB), tercatat adanya fluktuasi nilai kekeruhan yang sangat tajam bahkan mencapai angka negatif di luar jangkauan sensor. Ketidakstabilan ini dipicu oleh intensitas cahaya matahari yang masih sangat kuat pada jam tersebut, sehingga mengganggu kinerja fototransistor pada sensor kekeruhan yang bekerja dengan prinsip hamburan cahaya. Sebaliknya, saat memasuki pukul 17.50 hingga 20.20 WIB di mana intensitas cahaya mulai meredup, pembacaan sensor menjadi jauh lebih stabil pada kisaran 28 – 53 NTU. Saat kalibrasi sensor kekeruhan dengan membandingkan nilai

sensor dan nilai turbidity meter sebagai kalibrator, proses dilakukan dalam laboratorium yang tertutup sehingga tidak terkena sinar matahari langsung. Sedangkan saat proses pengujian di kolam akuakultur, dilakukan di tempat terbuka, sehingga mendapatkan pembacaan kekeruhan yang negatif. Nilai tersebut di luar fungsi keanggotaan yang diterapkan pada logika fuzzy, sehingga pada waktu tersebut, Kesimpulan kualitas air hanya ditentukan menggunakan parameter pH dan TDS.

Untuk parameter zat terlarut (TDS), pengukuran selama 360 menit menunjukkan hasil yang fluktuatif antara 151 hingga 271 ppm. Meskipun data sempat stabil di angka 260 ppm pada awal pengamatan, terjadi dinamika penurunan dan kenaikan nilai yang dipengaruhi oleh aktivitas organik di dalam kolam, seperti akumulasi feses ikan serta sisa pakan yang tidak dikonsumsi. Kendati mengalami perubahan berkala, seluruh nilai TDS yang terekam masih berada dalam kategori layak dan aman untuk kelangsungan hidup ikan nila.

Sementara itu, pengukuran tingkat keasaman (pH) menghasilkan nilai yang berkisar antara 7,51 hingga 8,52 sepanjang masa pengujian. Titik terendah pH tercatat pada menit pertama (pukul 14.20 WIB), sedangkan lonjakan tertinggi terjadi pada menit ke-200 (pukul 17.40 WIB). Pergeseran nilai pH ini umumnya dipengaruhi oleh konsentrasi Karbon Dioksida hasil respirasi organisme dan polusi, serta dekomposisi bahan organik di kolam yang cenderung meningkatkan keasaman air.

Secara keseluruhan, sistem menyimpulkan bahwa kualitas air kolam selama 6 jam berada pada status "Baik" dan "Cukup". Transisi status dari "Baik" menjadi "Cukup" terdeteksi paling sering saat nilai pH merambat naik mendekati angka 8,5. Hal ini disebabkan oleh mekanisme logika fuzzy yang menempatkan rentang nilai 8 hingga 8,5 sebagai area keragu-raguan (*threshold*) antara kondisi layak dan tidak layak, yang kemudian memengaruhi perubahan pada *output* klasifikasi kualitas air secara otomatis.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merealisasikan sistem pemantauan kualitas air akuakultur berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mengintegrasikan sensor pH, TDS, dan turbiditas dengan aplikasi Android secara sinkron dan akurat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perangkat keras mampu menyajikan data parameter air serta klasifikasi kualitasnya secara otomatis dengan performa transmisi yang sangat efisien, terbukti dari rata-rata jeda waktu pengiriman data yang hanya sebesar 2 detik. Dengan demikian, sistem ini mampu menyediakan informasi secara *real-time* yang memudahkan pembudidaya dalam melakukan pengawasan jarak jauh, meminimalkan risiko keterlambatan mitigasi, dan meningkatkan

efektivitas manajemen kualitas air pada ekosistem akuakultur. Namun penelitian ini masih terbatas pada pengujian di kolam akuakultur skala kecil, sehingga diharapkan pada penelitian selanjutnya, alat bisa diuji pada tambak ikan skala besar hingga pengujian pada keramba jaring apung dengan parameter kualitas air yang lebih kompleks.

### Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera atas dukungan tempat dan fasilitas laboratorium untuk pelaksanaan penelitian ini.

### Daftar Rujukan

- [1] Erawati, P., Prasti, D., Kriswinarso, T.B., 2025. Internet of Things (IoT)-Based Water Quality Monitoring System Design for Tilapia Fish Farming Ponds. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence* 5, 860–869. <https://doi.org/10.47709/BRILLIANCE.V5I2.6927>
- [2] Lindholm-Lehto, P., 2023. Water quality monitoring in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture, Fish and Fisheries* 3, 113–131. <https://doi.org/10.1002/AFF2.102>
- [3] Abd El-Hack, M.E., El-Saadony, M.T., Nader, M.M., Salem, H.M., El-Tahan, A.M., Soliman, S.M., Khafaga, A.F., 2022. Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Int. J. Biometeorol.* 66, 2183. <https://doi.org/10.1007/S00484-022-02347-6>
- [4] Zhang, K., Ye, Z., Qi, M., Cai, W., Saraiva, J.L., Wen, Y., Liu, G., Zhu, Z., Zhu, S., Zhao, J., 2025. Water Quality Impact on Fish Behavior: A Review From an Aquaculture Perspective. *Rev. Aquac.* 17, e12985. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12985>
- [5] Chen, C.H., Wu, Y.C., Zhang, J.X., Chen, Y.H., 2022. IoT-Based Fish Farm Water Quality Monitoring System. *Sensors* 22. <https://doi.org/10.3390/S22176700>
- [6] Elfitasari, T., Albert, A., 2017. Challenges of Small Scale Fish Farmers for Fish Product Sustainability. *Omni-Akuatika* 13. <https://doi.org/10.20884/1.OA.2017.13.2.256>
- [7] Gkikas, D.C., Gkikas, M.C., Theodorou, J.A., 2024. Fostering Sustainable Aquaculture: Mitigating Fish Mortality Risks Using Decision Trees Classifiers. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 2129 14, 2129. <https://doi.org/10.3390/APP14052129>
- [8] Mugwanya, M., Dawood, M.A.O., Kimera, F., Sewilam, H., 2022. Anthropogenic temperature fluctuations and their effect on aquaculture: A comprehensive review. *Aquac. Fish.* 7, 223–243. <https://doi.org/10.1016/J.AAF.2021.12.005>
- [9] Li, H.C., Yu, K.W., Lien, C.H., Lin, C., Yu, C.R., Vaidyanathan, S., 2023. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy Logic Control for Ammonia Nitrogen Management. *Journal of Marine Science and Engineering* 2023, Vol. 11, Page 1109 11, 1109. <https://doi.org/10.3390/JMSE11061109>
- [10] Abdullah, A.F., Man, H.C., Mohammed, A., Karim, M.M.A., Yunusa, S.U., Jais, N.A.B.M., 2024. Charting the aquaculture internet of things impact: Key applications, challenges, and future trend. *Aquac. Rep.* 39, 102358. <https://doi.org/10.1016/J.AQREP.2024.102358>
- [11] Prafanto, A., Septiarini, A., Puspitasari, N., Taruk, M., Mahendra, D.A., 2024. IoT-based Water Quality Control in Tilapia Aquaculture Using Fuzzy Logic. *Innovation in Research of Informatics (Innovatics)* 6, 57–64. <https://doi.org/10.37058/INNOVATICS.V6I2.11271>
- [12] Rastegari, H., Nadi, F., Lam, S.S., Ikhwanuddin, M., Kasan, N.A., Rahmat, R.F., Mahari, W.A.W., 2023. Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. *Smart Agricultural Technology* 4, 100187. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2023.100187>
- [13] Kazeem Abiodun, M., Babatunde, A., Adebukola, O.S., Kehinde, E., Adeniyi, K., Idris, R.B., 2026. Machine Learning-Driven Smart Aquaculture Technology for Climate-Resilient Water Quality Monitoring. *Journal of Smart Agriculture and Environmental Technology* 4, 1–6. <https://doi.org/10.60105/JOSAET.2026.4.1.1-6>