

Sistem Monitoring Kualitas Air pada Budidaya Ikan Mujaer Berbasis IoT Menggunakan *Decision Tree*

Adam Bektı Laksono^{*1}, Anggi Zafia², Muhamad Azrino Gustalika³

^{1,2,3}Telkom University Purwokerto, Indonesia

Email: ¹adambektılaksono@student.telkomuniversity.ac.id, ²anggiz@telkomuniversity.ac.id,
³azrino@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kualitas air merupakan faktor penting dalam budidaya ikan mujaer karena perubahan pH, suhu, TDS, dan turbidity dapat memengaruhi kesehatan serta tingkat kelangsungan hidup ikan. Pada kolam ikan Desa Gript, pemantauan kualitas air sebelumnya masih dilakukan secara manual sehingga pengelola berpotensi terlambat menentukan waktu pengelolaan air. Penelitian ini bertujuan membangun sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things menggunakan ESP32, sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, sensor turbidity, Firebase, dan aplikasi monitoring. Sistem menerapkan algoritma decision tree untuk mengklasifikasikan kondisi air menjadi “Kondisi Air Normal” dan “Air Harus Dikuras”. Aturan keputusan menetapkan kondisi normal pada pH 4–11, suhu 20–27°C, $TDS \leq 42024$ ppm, dan turbidity ≤ 4 NTU; pelanggaran satu ambang menghasilkan status “Air Harus Dikuras”. Pengujian sensor dilakukan menggunakan MAE dan akurasi relatif, sedangkan pengujian perangkat lunak dilakukan menggunakan metode black-box testing. Hasil pengujian menunjukkan akurasi relatif sensor pH sebesar 98,59%, sensor suhu 99,01%, sensor TDS 96,55%, dan sensor turbidity 93,88%. Selama implementasi pada 20 Januari 2026 sampai 20 Maret 2026, sistem mencatat 1418 data, terdiri dari 1414 data “Kondisi Air Normal” dan 4 data “Air Harus Dikuras”. Perubahan status dipicu oleh nilai turbidity yang melewati ambang batas 4 NTU, dengan nilai tertinggi 4,92 NTU. Estimasi mortalitas ikan menurun dari rata-rata 39,16% sebelum pemasangan alat menjadi 21,76% setelah alat diterapkan, sedangkan berat panen meningkat dari rata-rata 507 kg menjadi 652 kg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat membantu pemantauan kualitas air dan mendukung pengambilan keputusan pengelolaan air secara lebih terukur.

Kata kunci: *Decision Tree, ESP32, Firebase, Internet of Things, Kualitas Air, Mujaer.*

Water Quality Monitoring System for Mujair Fish Cultivation Using an IoT-Based Decision Tree Algorithm

Abstract

Water quality is an important factor in mujair fish cultivation because changes in pH, temperature, TDS, and turbidity can affect fish health and survival rate. In the fish pond of Gript Village, water quality monitoring was previously carried out manually, causing potential delays in determining proper water management actions. This study aims to develop an Internet of Things-based water quality monitoring system using ESP32, a pH sensor, DS18B20 temperature sensor, TDS sensor, turbidity sensor, Firebase, and a monitoring application. The system applies the decision tree algorithm to classify water conditions into “Normal Water Condition” and “Water Must Be Drained”. The decision rule defines normal conditions as pH 4–11, temperature 20–27°C, $TDS \leq 42024$ ppm, and turbidity ≤ 4 NTU; violation of any one threshold results in a “Water Must Be Drained” status. Sensor testing was conducted using MAE and relative accuracy, while software testing was carried out using the black-box testing method. The results show that the relative accuracy of the pH sensor was 98.59%, the temperature sensor was 99.01%, the TDS sensor was 96.55%, and the turbidity sensor was 93.88%. During the implementation period from January 20, 2026, to March 20, 2026, the system recorded 1418 data entries, consisting of 1414 “Normal Water Condition” data and 4 “Water Must Be Drained” data. The status change was triggered by turbidity values exceeding the 4 NTU threshold, with the highest value reaching 4.92 NTU. The estimated fish mortality decreased from an average of 39.16% before system implementation to 21.76% after implementation, while the average harvest weight increased from 507 kg to 652 kg. The results indicate that the system can support water quality monitoring and assist water management decisions more measurably.

Keywords: *Decision Tree, ESP32, Firebase, Internet of Things, Mujair, Water Quality.*

1. PENDAHULUAN

Budidaya ikan mujaer merupakan salah satu kegiatan perikanan air tawar yang membutuhkan pengelolaan kualitas air secara teratur agar pertumbuhan ikan dapat berlangsung optimal. Kualitas air memiliki hubungan dengan produktivitas akuakultur karena perubahan kondisi perairan dapat memengaruhi pertumbuhan, kesehatan, dan tingkat kelangsungan hidup ikan [1]. Parameter seperti pH, suhu, *total dissolved solids* (TDS), dan *turbidity* menjadi indikator penting karena dapat menggambarkan perubahan kondisi fisik dan kimia air kolam. Pada ikan kelompok tilapia, peningkatan suhu dapat menurunkan toleransi terhadap kondisi hipoksia dan memengaruhi morfologi insang, sehingga perubahan lingkungan perairan perlu dipantau secara berkala [2].

Pada praktik budidaya skala kecil, pemantauan kualitas air masih banyak dilakukan secara manual melalui pengamatan visual terhadap warna air, bau, tingkat kekeruhan, dan perilaku ikan. Cara tersebut memiliki keterbatasan karena perubahan kualitas air tidak selalu terlihat secara langsung, terutama ketika perubahan terjadi secara bertahap. Kondisi ini dapat menyebabkan tindakan pengelolaan air, seperti pengurasan atau penggantian air, dilakukan terlambat. Perubahan parameter kualitas air dan iklim juga terbukti berpengaruh terhadap pertumbuhan ikan tilapia, sehingga pemantauan berbasis data diperlukan untuk membantu menjaga kondisi kolam tetap sesuai dengan kebutuhan ikan [3].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang untuk membangun sistem pemantauan kualitas air secara *real-time*. Teknologi IoT memungkinkan sensor membaca parameter air, mikrokontroler memproses data, dan data dikirimkan ke media penyimpanan berbasis *cloud* agar dapat diakses melalui aplikasi. Tinjauan sistematis mengenai sensor IoT pada akuakultur menunjukkan bahwa pH, suhu, TDS, dan *turbidity* termasuk parameter yang banyak digunakan dalam pemantauan kualitas air karena mudah diukur dan relevan terhadap kondisi budidaya [4]. Dengan demikian, penerapan IoT dapat menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan pengelola terhadap pemantauan manual.

Beberapa penelitian terdahulu telah menerapkan sistem berbasis IoT untuk pemantauan kualitas air pada budidaya ikan. Penelitian tentang pemantauan dan pengendalian kualitas air budidaya tilapia berbasis IoT telah menggunakan beberapa sensor untuk membantu pengawasan kondisi air, tetapi sistem tersebut belum menitikberatkan pada klasifikasi kondisi air menjadi keputusan operasional sederhana untuk tindakan kurus [5]. Penelitian lain merancang sistem pemantauan kualitas air kolam ikan tilapia menggunakan ESP32 dan aplikasi Blynk, namun fokus utamanya masih pada pemantauan jarak jauh dan belum menerapkan algoritma klasifikasi untuk menentukan status tindakan pengelolaan air [6]. Artikel pada Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia juga menunjukkan penerapan IoT pada sistem akuaponik dengan pemantauan pH dan suhu, tetapi konteksnya masih pada akuaponik lele dan kangkung serta belum diarahkan pada klasifikasi kondisi air untuk keputusan kurus air pada budidaya mujaer [7].

Penelitian lain mengembangkan aplikasi Android berbasis *Firebase* untuk pemantauan kualitas air pada budidaya ikan, tetapi pembahasannya lebih menekankan integrasi aplikasi dan pengiriman data dibandingkan pengambilan keputusan berbasis algoritma [8]. Penerapan IoT pada budidaya ikan nila dengan sistem bioflok juga telah dilakukan untuk memantau suhu, pH, dan kekeruhan, tetapi konteks penelitian tersebut berfokus pada bioflok dan belum membahas keputusan kurus air berbasis klasifikasi [9]. Sistem pemantauan kualitas air dan kendali pakan otomatis berbasis IoT juga telah dikembangkan, namun parameter yang digunakan belum mencakup pH dan fokus sistem lebih diarahkan pada integrasi pemantauan air dengan pemberian pakan otomatis [10].

Dari sisi sistem yang lebih kompleks, penelitian berbasis IoT pada kolam ikan telah memanfaatkan sensor nirkabel dan mekanisme otomatisasi untuk memantau parameter kualitas air, tetapi sistem tersebut lebih sesuai untuk skala yang lebih besar dan belum secara khusus diarahkan pada budidaya mujaer skala kecil [11]. Sementara itu, pengembangan sistem pengambilan keputusan berbasis IoT dan *decision tree* telah menunjukkan bahwa data kualitas air dapat digunakan untuk mendukung klasifikasi kondisi kolam secara *real-time*, tetapi penelitian tersebut menggunakan dataset besar multi-spesies dan belum difokuskan pada kebutuhan pengelolaan air kolam mujaer di lokasi budidaya kecil [12].

Algoritma *decision tree* dipilih karena mampu menghasilkan aturan keputusan berbentuk percabangan *if-then* yang sederhana, transparan, dan mudah ditelusuri berdasarkan nilai setiap parameter kualitas air. Dibandingkan metode klasifikasi ringan lainnya, seperti *k-nearest neighbor* yang memerlukan penyimpanan data acuan dan perhitungan jarak pada setiap prediksi, serta *support vector machine* yang memerlukan penentuan parameter model, struktur *decision tree* lebih mudah diterapkan sebagai aturan keputusan pada ESP32. Selain itu, setiap hasil klasifikasi dapat dijelaskan berdasarkan parameter yang melewati ambang batas, sehingga informasi yang dihasilkan lebih mudah dipahami oleh pengelola kolam. Karakteristik tersebut sesuai dengan

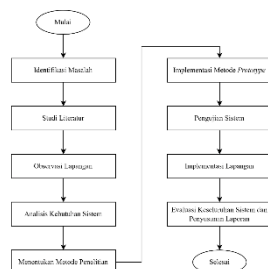
kebutuhan operasional budidaya skala kecil yang mengutamakan kecepatan pemrosesan, penggunaan sumber daya yang ringan, serta kemudahan interpretasi hasil keputusan [12], [13].

Berdasarkan perbandingan tersebut, dapat diketahui bahwa penelitian sebelumnya umumnya telah membahas pemantauan kualitas air berbasis *IoT*, integrasi aplikasi, pengiriman data ke *cloud*, pengendalian pakan, atau sistem pengambilan keputusan pada konteks yang lebih luas. Namun, masih terdapat celah penelitian pada penerapan sistem *monitoring* kualitas air yang secara khusus dirancang untuk budidaya ikan mujaer skala kecil, menggunakan parameter pH, suhu, TDS, dan *turbidity*, serta menghasilkan status keputusan yang langsung dapat dipahami oleh pengelola kolam. Celah lainnya adalah masih terbatasnya penelitian yang menghubungkan hasil pemantauan kualitas air dengan evaluasi lapangan berupa perbandingan sebelum dan sesudah pemasangan alat, khususnya pada indikator berat panen dan estimasi mortalitas.

Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air pada budidaya ikan mujaer berbasis *IoT* menggunakan ESP32, sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, sensor *turbidity*, *Firestore*, dan aplikasi *monitoring*. Sistem menerapkan algoritma *decision tree* untuk mengklasifikasikan kondisi air menjadi “Kondisi Air Normal” dan “Air Harus Dikuras”. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan sistem yang mampu memantau parameter kualitas air secara berkala, memberikan status kondisi air berdasarkan data sensor, serta membantu pengelola kolam dalam menentukan tindakan pengelolaan air secara lebih tepat waktu dan terukur.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian pada artikel ini disusun untuk menjelaskan tahapan pengembangan sistem *monitoring* kualitas air pada budidaya ikan mujaer berbasis *Internet of Things* dan algoritma *decision tree*. Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah di kolam ikan Desa Gripti, studi literatur, observasi lapangan, analisis kebutuhan sistem, penentuan metode penelitian, implementasi metode *prototype*, pengujian sistem, implementasi lapangan, dan evaluasi keseluruhan sistem. Alur penelitian tersebut digunakan agar proses pengembangan sistem berjalan secara sistematis, mulai dari perumusan kebutuhan pengguna sampai evaluasi hasil penerapan alat pada lingkungan kolam.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

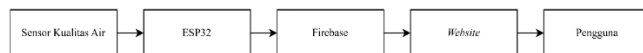
Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang digunakan dalam pengembangan sistem. Tahap identifikasi masalah dilakukan untuk mengetahui permasalahan utama pada budidaya ikan mujaer, yaitu keterlambatan pengelola dalam menentukan waktu pengelolaan air. Tahap studi literatur digunakan untuk menentukan parameter kualitas air, teknologi *IoT*, dan algoritma klasifikasi yang sesuai. Tahap observasi lapangan dilakukan untuk memahami kondisi kolam dan kebutuhan pengguna. Selanjutnya, analisis kebutuhan sistem dilakukan untuk menentukan perangkat keras, perangkat lunak, serta data yang digunakan. Setelah itu, sistem dikembangkan menggunakan metode *prototype*, diuji melalui pengujian sensor dan pengujian fungsi aplikasi, kemudian diterapkan pada kolam ikan mujaer selama periode implementasi. Tahap akhir adalah evaluasi keseluruhan sistem berdasarkan hasil *monitoring*, status klasifikasi, serta perbandingan hasil budidaya sebelum dan sesudah pemasangan alat.

2.1. Rancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri dari perangkat keras, perangkat lunak, media penyimpanan data, dan aplikasi *monitoring*. Parameter kualitas air yang dipantau meliputi pH, suhu, TDS, dan *turbidity*. Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pH, suhu, TDS, dan *turbidity* merupakan parameter yang umum digunakan dalam sistem pemantauan kualitas air berbasis *IoT* pada akuakultur [4].

Perangkat keras utama yang digunakan adalah ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor pH untuk membaca tingkat keasaman air, sensor suhu DS18B20 untuk membaca temperatur air, sensor TDS untuk membaca

kandungan padatan terlarut, dan sensor *turbidity* untuk membaca tingkat kekeruhan air. Penggunaan ESP32 dan sensor kualitas air juga telah diterapkan pada sistem pemantauan kolam ikan tilapia berbasis *IoT* karena perangkat tersebut mendukung pemantauan jarak jauh secara *real-time* [5].



Gambar 2. Arsitektur Sistem *Monitoring* Kualitas Air

Gambar 2 menunjukkan alur kerja sistem *monitoring* kualitas air. Sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, dan sensor *turbidity* membaca data air kolam secara langsung. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32, kemudian dikirimkan melalui jaringan internet ke *Firebase*. Penggunaan *Firebase* sebagai media penyimpanan data pada sistem *monitoring* kualitas air berbasis aplikasi pernah diterapkan pada penelitian sebelumnya karena mendukung pengiriman dan sinkronisasi data dari perangkat ke aplikasi secara cepat [8].

Tabel 1. Kebutuhan Perangkat Sistem

Komponen	Fungsi
ESP32	Mikontroler utama untuk membaca sensor, memproses data, dan mengirimkan data ke <i>Firebase</i>
Sensor pH	Mengukur tingkat keasaman air kolam
Sensor DS18B20	Mengukur suhu air kolam
Sensor TDS	Mengukur kandungan padatan terlarut dalam air
Sensor <i>turbidity</i>	Mengukur tingkat kekeruhan air
<i>Firebase</i>	Menyimpan data hasil pembacaan sensor secara <i>real-time</i>
Aplikasi <i>monitoring</i>	Menampilkan data sensor, riwayat pengukuran, dan status kondisi air

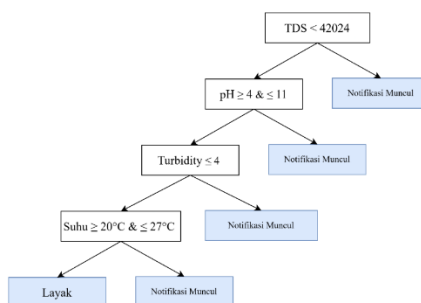
2.2. Alur Kerja Sistem

Alur kerja sistem dimulai dari proses inisialisasi perangkat, koneksi Wi-Fi, pembacaan sensor, pengolahan data, klasifikasi kondisi air, pengiriman data ke *Firebase*, dan penampilan data pada aplikasi. Ketika alat dinyalakan, ESP32 menghubungkan sistem ke jaringan Wi-Fi dan mengaktifkan seluruh sensor. Setelah koneksi berhasil, ESP32 membaca nilai pH, suhu, TDS, dan *turbidity* secara berkala. Data sensor kemudian diproses menggunakan aturan klasifikasi untuk menentukan status kondisi air.

Sistem *monitoring* kualitas air berbasis *IoT* pada akuakultur perlu dirancang agar data sensor dapat diperoleh secara cepat dan digunakan untuk mendukung tindakan pengelolaan air. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa sistem pemantauan kualitas air berbasis *IoT* perlu memperhatikan proses akuisisi data, pengiriman data, dan kalibrasi perangkat agar hasil pemantauan dapat digunakan secara efektif [10].

2.3. Algoritma *Decision Tree*

Algoritma *decision tree* digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi air berdasarkan nilai pH, suhu, TDS, dan *turbidity*. Algoritma ini dipilih karena memiliki struktur keputusan yang mudah dipahami dalam bentuk percabangan atau aturan *if-then*. Pada sistem pemantauan kualitas air kolam ikan, penggunaan *decision tree* dapat membantu mengubah data sensor menjadi keputusan yang lebih mudah dipahami oleh pengguna [13].



Gambar 3. Pohon Keputusan Klasifikasi Kondisi Air

Gambar 3 menunjukkan proses klasifikasi kondisi air berdasarkan parameter TDS, pH, *turbidity*, dan suhu. Proses klasifikasi dilakukan dengan memeriksa apakah nilai setiap parameter berada pada ambang batas yang telah ditentukan. Apabila seluruh parameter memenuhi ambang batas, sistem menghasilkan status “Kondisi Air Normal”. Sebaliknya, apabila salah satu parameter tidak memenuhi ambang batas, sistem menghasilkan status “Air Harus Dikuras”.

Penggunaan model berbasis pembelajaran mesin pada perangkat berbiaya rendah juga telah digunakan untuk memproses data kualitas air secara *real-time* pada budidaya tilapia. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengolahan data sensor dapat dilakukan untuk mendukung analisis dan prediksi kondisi air pada sistem akuakultur [8].

Tabel 2. Aturan Klasifikasi Kondisi Air

Parameter	Ambang Batas	Status Jika Tidak Memenuhi
TDS	≤ 42024 ppm	Air Harus Dikuras
pH	4–11	Air Harus Dikuras
<i>Turbidity</i>	≤ 4 NTU	Air Harus Dikuras
Suhu	20–27°C	Air Harus Dikuras
Seluruh parameter memenuhi ambang batas	Sesuai aturan	Kondisi Air Normal

Aturan keputusan pada sistem dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika $TDS \leq 42024$ ppm, pH berada pada rentang 4–11, *turbidity* ≤ 4 NTU, dan suhu berada pada rentang 20–27°C, maka sistem menghasilkan status “Kondisi Air Normal”. Jika salah satu parameter berada di luar ambang batas tersebut, maka sistem menghasilkan status “Air Harus Dikuras”.

2.4. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap alat pembanding. Sensor yang diuji meliputi sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, dan sensor *turbidity*. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor pada sistem dengan nilai dari alat pembanding. Proses kalibrasi dan verifikasi sensor penting dilakukan dalam sistem *monitoring* kualitas air agar data yang dikirimkan ke sistem memiliki tingkat keandalan yang cukup [14].

Sebelum pengambilan data lapangan, setiap sensor dikalibrasi dan diverifikasi menggunakan larutan standar atau alat ukur pembanding. Kalibrasi sensor pH dilakukan dengan mencelupkan probe secara bergantian ke dalam larutan *buffer* pH 4,00, 6,86, dan 9,18. Pada setiap larutan, pembacaan ditunggu hingga stabil, kemudian nilai ADC dan tegangan rata-rata dicatat untuk memperoleh nilai *slope* dan *intercept* pada persamaan konversi pH. Sensor suhu DS18B20 diverifikasi dengan mencelupkan sensor dan alat ukur suhu pembanding pada sampel air yang sama, kemudian mencatat kedua hasil pengukuran setelah nilainya stabil. Sensor TDS dikalibrasi dengan membandingkan pembacaannya terhadap alat ukur TDS pada sampel air yang sama, disertai kompensasi suhu berdasarkan nilai yang dibaca oleh sensor DS18B20. Sementara itu, sensor *turbidity* dikalibrasi dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap alat ukur kekeruhan pada beberapa sampel air dengan tingkat kekeruhan yang berbeda. Probe dibersihkan menggunakan air bersih sebelum berpindah sampel untuk menghindari kontaminasi silang. Setelah kalibrasi awal selesai, pengujian setiap sensor dilakukan sebanyak sepuluh kali dengan mencatat nilai sensor dan alat pembanding, kemudian hasilnya digunakan untuk menghitung MAE dan akurasi relatif.

Nilai kesalahan pembacaan sensor dihitung menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE). MAE digunakan untuk mengetahui rata-rata selisih absolut antara nilai sensor dan nilai alat pembanding. Rumus MAE ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (1)$$

Keterangan:

MAE = *Mean Absolute Error*

n = jumlah data pengujian

x_i = nilai pembacaan sensor ke-i

y_i = nilai pembacaan alat pembanding ke-i

Akurasi relatif digunakan untuk mengetahui tingkat kedekatan hasil pembacaan sensor terhadap alat pembanding. Rumus akurasi relatif ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\text{Akurasi Relatif} = \left(1 - \frac{MAE}{\bar{y}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

$\bar{y}$ = rata-rata nilai pembacaan alat pembanding

MAE = nilai rata-rata kesalahan absolut

Hasil pengujian sensor digunakan untuk memastikan bahwa data pH, suhu, TDS, dan *turbidity* layak digunakan sebagai input klasifikasi kondisi air. Jika akurasi relatif sensor berada pada nilai yang tinggi, maka data sensor dapat digunakan untuk mendukung proses *monitoring* dan penentuan status kondisi air.

2.5. Pengujian Software dan Sistem

Pengujian *software* dilakukan menggunakan metode *black-box testing*. Pengujian ini berfokus pada fungsi sistem dari sisi pengguna tanpa meninjau struktur kode program secara langsung. Fitur yang diuji meliputi tampilan halaman utama, pembaruan data sensor, koneksi ESP32 ke *Firebase*, tampilan riwayat data, dan perubahan status kondisi air. Pengujian aplikasi pada sistem *IoT* perlu dilakukan untuk memastikan bahwa data sensor dapat ditampilkan secara tepat pada antarmuka pengguna [15].

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memastikan bahwa perangkat keras dan perangkat lunak dapat bekerja secara terintegrasi. Pengujian ini mencakup kemampuan ESP32 membaca data sensor, mengirim data ke *Firebase*, menampilkan data pada aplikasi, menyimpan riwayat pengukuran, dan menghasilkan status kondisi air berdasarkan aturan *decision tree*. Sistem dinyatakan berhasil apabila seluruh skenario pengujian berjalan sesuai keluaran yang diharapkan.

2.6. Implementasi Lapangan dan Evaluasi Hasil Budidaya

Evaluasi hasil budidaya dilakukan dengan membandingkan data sebelum dan sesudah pemasangan alat. Data sebelum pemasangan alat berasal dari periode budidaya sebelumnya, sedangkan data sesudah pemasangan alat berasal dari periode implementasi tahun 2026. Perbandingan dilakukan berdasarkan berat panen dan estimasi mortalitas ikan. Jumlah bibit awal pada setiap periode adalah 5000 ekor, sedangkan hasil panen dicatat dalam satuan kilogram. Oleh karena itu, estimasi jumlah ikan panen dihitung menggunakan acuan $1 \text{ kg} \approx 6$ ekor ikan mujaer.

Estimasi jumlah ikan panen dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$I_{\text{panen}} = B_{\text{panen}} \times 6 \quad (3)$$

Keterangan:

I_{panen} = estimasi jumlah ikan yang berhasil dipanen

B_{panen} = berat panen dalam kilogram

6 = acuan jumlah ikan mujaer per kilogram

Estimasi jumlah ikan mati dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$I_{\text{mati}} = I_{\text{bibit}} - I_{\text{panen}} \quad (4)$$

Keterangan:

I_{mati} = estimasi jumlah ikan mati

I_{bibit} = jumlah bibit awal

I_{panen} = estimasi jumlah ikan yang berhasil dipanen

Persentase mortalitas ikan dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$\text{Mortalitas} = \frac{I_{\text{mati}}}{I_{\text{bibit}}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

Mortalitas = persentase kematian ikan

I_{mati} = estimasi jumlah ikan mati

I_{bibit} = jumlah bibit awal

Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk membandingkan estimasi mortalitas sebelum dan sesudah pemasangan alat. Dengan demikian, evaluasi tidak hanya dilakukan berdasarkan keberhasilan teknis sistem, tetapi juga berdasarkan perbedaan hasil budidaya setelah sistem *monitoring* kualitas air diterapkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

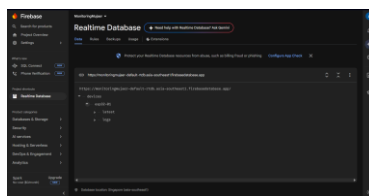
3.1. Hasil Implementasi Sistem

Sistem *monitoring* kualitas air pada budidaya ikan mujaer berhasil direalisasikan menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama, sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, dan sensor *turbidity*. Seluruh sensor dipasang pada media air kolam untuk membaca parameter kualitas air secara langsung. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh ESP32 dan dikirimkan ke *Firebase* melalui koneksi internet. Data yang tersimpan pada *Firebase* ditampilkan kembali pada aplikasi *monitoring* dalam bentuk nilai parameter, status kondisi air, keterangan, dan riwayat data.



Gambar 4. Realisasi Perangkat Keras Sistem *Monitoring* Kualitas Air

Gambar 4 menunjukkan rangkaian perangkat keras sistem yang terdiri dari ESP32 dan beberapa sensor kualitas air. ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang membaca data dari sensor, memproses data, menjalankan aturan klasifikasi, dan mengirimkan data ke *Firebase*. Sensor pH digunakan untuk membaca tingkat keasaman air, sensor suhu DS18B20 digunakan untuk membaca temperatur air, sensor TDS digunakan untuk membaca kandungan padatan terlarut, sedangkan sensor *turbidity* digunakan untuk membaca tingkat kekeruhan air.



Gambar 5. Tampilan Data Sensor pada *Firebase*

Gambar 5 menunjukkan bahwa data sensor berhasil tersimpan pada *Firebase*. Data yang dikirimkan meliputi nilai pH, suhu, TDS, *turbidity*, waktu pengukuran, serta status kondisi air. Keberhasilan penyimpanan data ini menunjukkan bahwa komunikasi antara ESP32 dan *Firebase* dapat berjalan sesuai rancangan. Data pada *Firebase* juga digunakan sebagai sumber informasi yang ditampilkan pada aplikasi *monitoring*.

Selama implementasi lapangan, komunikasi IoT antara ESP32 dan *Firebase* mampu mendukung pengiriman dan penyimpanan data hasil pembacaan sensor. Sistem mencatat sebanyak 1418 data yang memuat nilai pH, suhu, TDS, *turbidity*, waktu pengukuran, dan status kondisi air. Data yang telah tersimpan pada *Firebase* dapat ditampilkan kembali pada aplikasi *monitoring* dalam bentuk data terbaru dan riwayat pengukuran. Namun, penelitian ini belum melakukan pengukuran waktu tunda jaringan secara kuantitatif dari saat data dikirim oleh ESP32 sampai diterima oleh *Firebase*. Oleh karena itu, kualitas komunikasi IoT pada penelitian ini dievaluasi secara fungsional berdasarkan keberhasilan pengiriman, penyimpanan, dan penampilan data, sedangkan pengukuran *delay* secara *end-to-end* menjadi keterbatasan yang perlu diuji pada penelitian selanjutnya.

Gambar 6. Tampilan Aplikasi *Monitoring* Kualitas Air

Gambar 6 menunjukkan tampilan aplikasi *monitoring* yang digunakan oleh pengelola kolam untuk melihat kondisi air. Aplikasi menampilkan nilai pH, suhu, TDS, *turbidity*, status kondisi air, serta riwayat data pemantauan. Status kondisi air ditampilkan dalam dua kategori, yaitu “Kondisi Air Normal” dan “Air Harus Dikuras”. Dengan adanya tampilan tersebut, pengelola dapat mengetahui kondisi air tanpa harus melakukan pengecekan manual secara terus-menerus.

3.2. Hasil Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap alat pembanding. Sensor yang diuji terdiri dari sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, dan sensor *turbidity*. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai sensor pada sistem dengan nilai dari alat ukur pembanding. Hasil perhitungan kesalahan menggunakan MAE dan akurasi relatif ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor

Sensor	MAE	Rata-Rata Alat Pembanding	Akurasi Relatif
Sensor pH	0,101	7,15	98,59%
Sensor suhu DS18B20	0,26°C	26,27°C	99,01%
Sensor TDS	12,5 ppm	362,1 ppm	96,55%
Sensor turbidity	0,198 NTU	3,235 NTU	93,88%

Berdasarkan Tabel 3, seluruh sensor memiliki akurasi relatif di atas 90%. Sensor suhu DS18B20 memperoleh akurasi relatif tertinggi, yaitu 99,01%, dengan nilai MAE sebesar 0,26°C. Sensor pH memperoleh akurasi relatif sebesar 98,59%, sensor TDS sebesar 96,55%, dan sensor *turbidity* sebesar 93,88%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor yang digunakan memiliki tingkat pembacaan yang cukup baik untuk kebutuhan *monitoring* kualitas air. Meskipun sensor *turbidity* memiliki akurasi relatif paling rendah dibandingkan sensor

lain, nilainya tetap berada di atas 90%, sehingga masih layak digunakan sebagai salah satu input klasifikasi kondisi air.

3.3. Hasil Pengujian *Software*

Pengujian *software* dilakukan menggunakan metode *black-box testing*. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa setiap fungsi pada aplikasi dan sistem penyimpanan data berjalan sesuai kebutuhan. Pengujian dilakukan pada fitur tampilan data sensor, tampilan status kondisi air, riwayat data, koneksi ke *Firebase*, serta perubahan status ketika nilai parameter melewati ambang batas. Hasil pengujian *software* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Software*

Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian
Menampilkan data pH	Aplikasi menampilkan nilai pH terbaru	Berhasil
Menampilkan data suhu	Aplikasi menampilkan nilai suhu terbaru	Berhasil
Menampilkan data TDS	Aplikasi menampilkan nilai TDS terbaru	Berhasil
Menampilkan data <i>turbidity</i>	Aplikasi menampilkan nilai <i>turbidity</i> terbaru	Berhasil
Menampilkan status kondisi air	Aplikasi menampilkan status “Kondisi Air Normal” atau “Air Harus Dikuras”	Berhasil
Menampilkan riwayat data	Aplikasi menampilkan data historis dari <i>Firebase</i>	Berhasil
Perubahan status saat parameter melewati ambang batas	Status berubah sesuai hasil klasifikasi	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4, seluruh fitur yang diuji berhasil berjalan sesuai fungsi yang diharapkan. Aplikasi mampu menampilkan data sensor terbaru, membaca data dari *Firebase*, menampilkan riwayat pengukuran, dan memperbarui status kondisi air berdasarkan hasil klasifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem perangkat lunak dapat bekerja sesuai kebutuhan pengguna dalam memantau kondisi air kolam.

3.4. Hasil *Monitoring Lapangan*

Implementasi lapangan dilakukan pada kolam ikan mujaer Desa Gripti selama periode 20 Januari 2026 sampai 20 Maret 2026. Selama periode tersebut, sistem mencatat data kualitas air secara berkala. Data yang dicatat meliputi pH, suhu, TDS, *turbidity*, status kondisi air, keterangan, dan waktu pengukuran. Rekapitulasi data hasil *monitoring* ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Data *Monitoring* Setelah Pemasangan Alat

Uraian	Hasil
Periode <i>monitoring</i>	20 Januari 2026–20 Maret 2026
Total data <i>monitoring</i>	1418 data
Data “Kondisi Air Normal”	1414 data
Data “Air Harus Dikuras”	4 data
Persentase data “Kondisi Air Normal”	99,72%
Persentase data “Air Harus Dikuras”	0,28%
Parameter pemicu status “Air Harus Dikuras”	<i>Turbidity</i>
Nilai <i>turbidity</i> tertinggi	4,92 NTU

Berdasarkan Tabel 5, sistem mencatat sebanyak 1418 data *monitoring*. Dari seluruh data tersebut, sebanyak 1414 data berada pada kategori “Kondisi Air Normal”, sedangkan 4 data berada pada kategori “Air Harus Dikuras”. Jika dihitung dalam bentuk persentase, data “Kondisi Air Normal” sebesar 99,72%, sedangkan data “Air Harus Dikuras” sebesar 0,28%. Status “Air Harus Dikuras” muncul karena nilai *turbidity* melewati ambang batas 4 NTU, dengan nilai tertinggi sebesar 4,92 NTU.

3.5. Kronologi Perubahan Status Kondisi Air

Perubahan status “Air Harus Dikuras” terjadi pada 25 Februari 2026. Pada tanggal tersebut, nilai *turbidity* mengalami kenaikan dan melewati ambang batas yang telah ditentukan. Kronologi perubahan status kondisi air ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kronologi Perubahan Status Kondisi Air pada 25 Februari 2026

Waktu	pH	Suhu (°C)	TDS (ppm)	Turbidity (NTU)	Status Kondisi Air	Keterangan
14.00	7,53	26,41	374,54	3,95	Kondisi Air Normal	Kondisi air masih berada di bawah ambang batas <i>turbidity</i>
14.21	7,74	26,12	392,80	4,05	Air Harus Dikuras	Nilai <i>turbidity</i> mulai melewati ambang batas
15.00	7,81	26,18	401,35	4,92	Air Harus Dikuras	Nilai <i>turbidity</i> mencapai nilai tertinggi
16.00	7,69	26,03	386,90	4,77	Air Harus Dikuras	Kondisi air masih berada di atas ambang batas
17.00	7,45	26,07	370,35	4,42	Air Harus Dikuras	Nilai <i>turbidity</i> mulai menurun tetapi masih melewati ambang batas
18.00	7,29	25,73	367,56	3,91	Kondisi Air Normal	Nilai <i>turbidity</i> kembali berada di bawah ambang batas

Berdasarkan Tabel 6, sistem mendeteksi perubahan status ketika nilai *turbidity* melewati ambang batas 4 NTU. Pada pukul 14.00, nilai *turbidity* berada pada 3,95 NTU sehingga status sistem masih “Kondisi Air Normal”. Pada pukul 14.21, nilai *turbidity* meningkat menjadi 4,05 NTU sehingga sistem mengubah status menjadi “Air Harus Dikuras”. Nilai *turbidity* kemudian meningkat menjadi 4,92 NTU pada pukul 15.00 dan menjadi nilai tertinggi pada periode tersebut. Status “Air Harus Dikuras” masih bertahan pada pukul 16.00 dan 17.00 karena nilai *turbidity* masih berada di atas ambang batas. Pada pukul 18.00, nilai *turbidity* turun menjadi 3,91 NTU sehingga sistem kembali menghasilkan status “Kondisi Air Normal”.

Secara keseluruhan, nilai pH selama implementasi berada pada rentang 7,23–7,81. Nilai suhu berada pada rentang 24,51–26,69°C. Nilai TDS berada pada rentang 305,5–401,35 ppm. Sementara itu, nilai *turbidity* berada pada rentang 1,60–4,92 NTU. Parameter *turbidity* menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap perubahan status karena hanya parameter tersebut yang melewati ambang batas pada data perubahan status.

3.6. Perbandingan Hasil Budidaya Sebelum dan Sesudah Pemasangan Alat

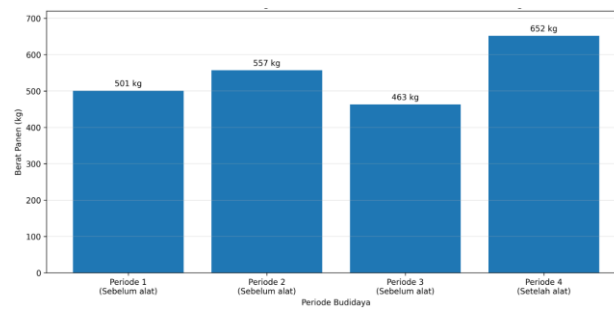
Evaluasi hasil budidaya dilakukan dengan membandingkan data historis sebelum pemasangan alat dan data setelah pemasangan alat. Perbandingan dilakukan berdasarkan berat panen dan estimasi mortalitas. Jumlah bibit awal pada setiap periode adalah 5000 ekor. Estimasi jumlah ikan panen dihitung menggunakan acuan 1 kg $\approx$ 6 ekor ikan mujaer. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Budidaya Sebelum dan Sesudah Pemasangan Alat

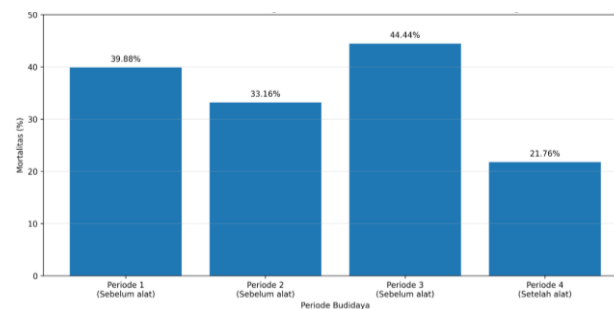
Periode	Kondisi	Berat Panen (kg)	Estimasi Ikan Panen (ekor)	Estimasi Ikan Mati (ekor)	Estimasi Mortalitas
Periode 1	Sebelum alat	501	3006	1994	39,88%
Periode 2	Sebelum alat	557	3342	1658	33,16%
Periode 3	Sebelum alat	463	2778	2222	44,44%
Periode 4	Sesudah alat	652	3912	1088	21,76%

Berdasarkan Tabel 7, estimasi mortalitas pada tiga periode sebelum pemasangan alat masing-masing sebesar 39,88%, 33,16%, dan 44,44%. Rata-rata estimasi mortalitas sebelum pemasangan alat adalah 39,16%. Setelah alat dipasang, estimasi mortalitas pada periode implementasi menjadi 21,76%. Dengan demikian, terdapat penurunan estimasi mortalitas sebesar 17,40 poin persentase. Selain itu, berat panen juga meningkat dari rata-rata 507 kg sebelum pemasangan alat menjadi 652 kg setelah pemasangan alat.

Gambar 7 menunjukkan bahwa berat panen setelah pemasangan alat lebih tinggi dibandingkan rata-rata berat panen pada tiga periode sebelumnya. Sebelum alat dipasang, berat panen tertinggi adalah 557 kg dan terendah 463 kg. Setelah alat dipasang, berat panen mencapai 652 kg. Peningkatan ini menunjukkan adanya perbedaan hasil budidaya setelah sistem *monitoring* diterapkan.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Berat Panen Sebelum dan Sesudah Pemasangan Alat



Gambar 8. Grafik Perbandingan Estimasi Mortalitas Sebelum dan Sesudah Pemasangan Alat

Gambar 8 menunjukkan bahwa estimasi mortalitas setelah pemasangan alat lebih rendah dibandingkan tiga periode sebelumnya. Penurunan ini tidak dapat diklaim sebagai akibat tunggal dari penerapan alat, karena hasil budidaya juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti pakan, cuaca, kepadatan ikan, kondisi bibit, dan kebiasaan pengelolaan kolam. Namun, sistem *monitoring* yang dibangun berperan sebagai alat bantu yang membuat kondisi air lebih mudah diamati secara berkala, sehingga pengelola dapat memperoleh informasi kondisi air lebih cepat dibandingkan pemantauan manual.

3.7. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *monitoring* kualitas air berbasis *IoT* dapat berjalan sesuai rancangan. Hal ini terlihat dari keberhasilan perangkat keras dalam membaca parameter pH, suhu, TDS, dan *turbidity*, serta keberhasilan sistem dalam mengirimkan data ke *Firestore* dan menampilkannya pada aplikasi *monitoring*. Sistem juga mampu menghasilkan status kondisi air berdasarkan aturan *decision tree*. Dengan demikian, sistem tidak hanya menampilkan angka sensor, tetapi juga memberikan informasi kondisi air yang lebih mudah dipahami oleh pengelola kolam.

Pengujian sensor menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki akurasi relatif di atas 90%. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor yang digunakan cukup layak untuk pemantauan kualitas air. Sensor suhu DS18B20 memiliki akurasi relatif tertinggi, sedangkan sensor *turbidity* memiliki akurasi relatif paling rendah dibandingkan sensor lainnya. Perbedaan ini dapat terjadi karena pembacaan *turbidity* sangat dipengaruhi oleh partikel tersuspensi, posisi sensor, cahaya, dan kondisi air saat pengukuran. Meskipun demikian, akurasi relatif sensor *turbidity* masih berada pada angka 93,88%, sehingga tetap dapat digunakan sebagai indikator perubahan kekeruhan air.

Apabila dibandingkan dengan penelitian akuakultur sejenis [10], hasil pengujian sensor pada penelitian ini menunjukkan tingkat kinerja yang relatif kompetitif. Penelitian terdahulu tersebut memperoleh akurasi sensor suhu sebesar 92,44%, sensor TDS sebesar 96,21%, dan sensor *turbidity* sebesar 98,11%. Sementara itu, penelitian ini memperoleh akurasi relatif sensor suhu sebesar 99,01%, sensor TDS sebesar 96,55%, dan sensor *turbidity* sebesar 93,88%, serta menambahkan pengujian sensor pH dengan akurasi relatif sebesar 98,59%. Dengan demikian, sensor suhu dan TDS pada penelitian ini memiliki hasil yang sedikit lebih tinggi, sedangkan sensor *turbidity* memiliki akurasi yang lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik sampel air, jumlah dan distribusi partikel tersuspensi, posisi sensor, pencahayaan, serta kondisi kalibrasi saat pengukuran. Meskipun demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada pengujian empat parameter sekaligus dan penerapannya secara langsung pada kolam budidaya selama satu periode pemantauan, sehingga evaluasi tidak hanya dilakukan pada perangkat, tetapi juga pada kondisi operasional lapangan.

Data implementasi lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar kondisi air berada pada status “Kondisi Air Normal”. Dari 1418 data yang tercatat, 1414 data atau 99,72% berada pada kondisi normal, sedangkan 4 data atau 0,28% berada pada status “Air Harus Dikuras”. Perubahan status terjadi ketika nilai *turbidity* melewati ambang batas 4 NTU pada 25 Februari 2026. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan kondisi air meskipun jumlah kejadiannya kecil. Dengan adanya status tersebut, pengelola dapat mengetahui kapan kondisi air mulai memerlukan perhatian.

Parameter *turbidity* menjadi pemicu utama perubahan status karena nilai pH, suhu, dan TDS selama implementasi cenderung berada dalam rentang yang stabil. Kenaikan *turbidity* pada 25 Februari 2026 terjadi secara bertahap dari 3,95 NTU pada pukul 14.00 menjadi 4,05 NTU pada pukul 14.21, lalu mencapai nilai tertinggi 4,92 NTU pada pukul 15.00. Setelah itu, nilai *turbidity* turun secara bertahap hingga 3,91 NTU pada pukul 18.00. Pola ini menunjukkan bahwa perubahan status bukan hanya berasal dari satu pembacaan sesaat, tetapi dari perubahan nilai *turbidity* yang melewati ambang batas selama beberapa waktu pengamatan.

Perbandingan sebelum dan sesudah pemasangan alat menunjukkan adanya perbedaan hasil budidaya. Rata-rata estimasi mortalitas sebelum pemasangan alat sebesar 39,16%, sedangkan setelah pemasangan alat menjadi 21,76%. Berat panen juga meningkat dari rata-rata 507 kg menjadi 652 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan sistem *monitoring* berkaitan dengan perbaikan pola pemantauan dan pengelolaan air. Namun, sistem tidak diklaim sebagai satu-satunya penyebab penurunan mortalitas dan peningkatan berat panen. Sistem lebih tepat diposisikan sebagai alat bantu pemantauan dan pendukung pengambilan keputusan, karena faktor lain dalam budidaya juga dapat memengaruhi hasil akhir.

Secara umum, sistem yang dikembangkan mampu menjawab kebutuhan pengelola kolam terhadap pemantauan kualitas air yang lebih terukur. Sebelum alat dipasang, pengelola lebih banyak mengandalkan pengamatan visual dan pengalaman. Setelah alat dipasang, data kualitas air dapat dicatat secara berkala, disimpan pada *Firebase*, dan ditampilkan pada aplikasi. Dengan adanya klasifikasi “Kondisi Air Normal” dan “Air Harus Dikuras”, pengelola memperoleh informasi yang lebih jelas untuk menentukan tindakan pengelolaan air. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis *IoT* dan *decision tree* dapat digunakan sebagai pendukung keputusan pada budidaya ikan mujaer skala kecil.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menghasilkan sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Internet of Things* pada budidaya ikan mujaer dengan memanfaatkan ESP32, sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor TDS, sensor *turbidity*, *Firebase*, dan aplikasi *monitoring*. Sistem mampu membaca parameter kualitas air, menyimpan data secara berkala, menampilkan data pada aplikasi, serta mengklasifikasikan kondisi air menggunakan algoritma *decision tree* menjadi “Kondisi Air Normal” dan “Air Harus Dikuras”. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki akurasi relatif di atas 90%, sehingga data sensor layak digunakan sebagai input klasifikasi. Selama implementasi lapangan, sistem mencatat 1418 data dengan 1414 data berstatus normal dan 4 data berstatus “Air Harus Dikuras” yang dipicu oleh peningkatan nilai *turbidity* melewati ambang batas 4 NTU. Perbandingan hasil budidaya menunjukkan estimasi mortalitas menurun dari rata-rata 39,16% menjadi 21,76%, sedangkan berat panen meningkat dari rata-rata 507 kg menjadi 652 kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dibangun dapat membantu pengelola kolam memantau kualitas air secara lebih terukur dan mendukung pengambilan keputusan pengelolaan air secara lebih tepat waktu, meskipun perubahan hasil budidaya tetap dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti pakan, cuaca, kondisi bibit, dan pola pengelolaan kolam. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan sistem dengan menambahkan pengukuran waktu tunda komunikasi *IoT*, beberapa titik sensor agar kondisi kolam dapat terwakili secara lebih merata, serta aktuator pompa untuk melakukan pengurasan dan pengisian air secara otomatis berdasarkan hasil klasifikasi kondisi air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Tumwesigye, W. Tumwesigye, F. Opio, C. Kemigabo, and B. Mujuni, “The Effect of Water Quality on Aquaculture Productivity in Ibanda District, Uganda,” *Aquaculture Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 23–36, 2022, doi: 10.3390/aquacj2010003.
- [2] Y. Zhou *et al.*, “Reduced Hypoxia Tolerance and Altered Gill Morphology at Elevated Temperatures May Limit the Survival of Tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) under Global Warming,” *Fishes*, vol. 7, no. 5, Oct. 2022, doi: 10.3390/fishes7050216.
- [3] M. A. B. Siddique, B. Mahalder, M. M. Haque, and S. K. S. Ahammad, “Impact of climatic and water quality parameters on Tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodfish growth: Integrating ARIMA and

- ARIMAX for precise modeling and forecasting,” *PLoS One*, vol. 20, no. 3 March, Mar. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0313846.
- [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,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agriengineering7030078.
- [5] L. Rosnita, M. Ikhwan, H. A. K. Aidilof, Salamah, W. Hamsi, and H. Y. Rangkuti, “Water Quality Monitoring and Control System for Tilapia Cultivation Based on Internet of Things,” *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 38–43, 2024, doi: 10.52088/ijesty.v4i4.566.
- [6] P. Erawati, D. Prasti, and T. B. Kriswinarso, “Internet of Things (IoT)-Based Water Quality Monitoring System Design for Tilapia Fish Farming Ponds,” *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 2, pp. 860–869, Sep. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i2.6927.
- [7] A. Pramana, E. Rizki Dalimunthe, and S. Styawati, “Teknologi Pemberian Nutrisi Ikan Lele dan Tanaman Kangkung pada Sistem Aquaponik Menggunakan Teknologi IoT,” *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 5, no. 3, pp. 813–829, Mar. 2025, doi: 10.52436/1.jpti.708.
- [8] M. Syaipul Anwar, P. Aplikasi, M. S. Anwar, and U. Latifa, “PERANCANGAN APLIKASI MONITORING KUALITAS AIR PADA BUDIDAYA IKAN NILA BERBASIS IOT MENGGUNAKAN ANDROID STUDIO,” *Jurnal POLEKTRO: Jurnal Power Elektronik*, vol. 11, no. 2, p. 2022, 2022.
- [9] E. Wasito, T. Prahara, A. Nursyahid, S. K. Anggraeni, and G. Miftah Delaili Muntaha, “Implementation Of IoT In Nila Fish Cultivation With Bioflock System,” 2024. [Online]. Available: <http://smartbioflok.com>,
- [10] S. E. Putri and V. Arinal, “Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air dan Kendali Pakan Otomatis untuk Budidaya Ikan Berbasis Internet of Things,” 2025. [Online]. Available: <https://journal.stmiki.ac.id>
- [11] C. H. Chen, Y. C. Wu, J. X. Zhang, and Y. H. Chen, “IoT-Based Fish Farm Water Quality Monitoring System,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/s22176700.
- [12] S. Kanwal *et al.*, “An Optimal Internet of Things-Driven Intelligent Decision-Making System for Real-Time Fishpond Water Quality Monitoring and Species Survival,” *Sensors*, vol. 24, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/s24237842.
- [13] A. S. Saud, S. Shakya, and B. Neupane, “Analysis of Depth of Entropy and GINI Index Based Decision Trees for Predicting Diabetes,” *Indian Journal of Computer Science*, vol. 6, no. 6, p. 19, Jan. 2021, doi: 10.17010/ijcs/2021/v6/i6/167641.
- [14] R. P. Shete, A. M. Bongale, and D. Dharrao, “IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture,” *MethodsX*, vol. 13, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.mex.2024.102906.
- [15] S. Bagi *et al.*, “Perancangan Aplikasi Mobile Berbasis Flutter untuk Pemantauan Data Sensor IoT,” *JSAT: Journal Scientific and Applied Informatics*, vol. 8, no. 1, 2025, doi: 10.36085.