

Implementasi Konsep Smart Aquaculture Berbasis IoT dalam Monitoring dan Otomatisasi Tambak Udang

Yuli Safrina¹, Al Khaidar², Munirul Ula³, Taufiq⁴, Rahmadi M. Ali⁵, Nurdin⁶

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Magister Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia

¹yulisafrina7@gmail.com, ²alkhaidarkutablang@gmail.com, ³munirulula@unimal.ac.id, ⁴taufiq.te@unimal.ac.id, ⁵rahmadimali91@gmail.com, ⁶nurdin@unimal.ac.id

Abstrak—Budidaya perikanan memerlukan pengelolaan kualitas air yang optimal untuk menjaga keberlangsungan hidup organisme budidaya. Penelitian ini bertujuan mengkaji penerapan konsep Smart Aquaculture berbasis Internet of Things (IoT) dalam sistem monitoring kualitas air dan otomatisasi tambak udang. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui studi literatur dari berbagai jurnal dan sumber ilmiah terkait teknologi IoT pada akuakultur. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi sensor pH, suhu, salinitas, dan dissolved oxygen mampu memantau kondisi air secara real-time serta mengendalikan aerator dan sistem pemberian pakan secara otomatis. Penerapan teknologi ini terbukti meningkatkan efisiensi energi, stabilitas kualitas air, serta produktivitas budidaya tambak secara berkelanjutan.

Kata kunci— *Smart Aquaculture, Internet Of Things, Monitoring Kualitas Air, Tambak Udang.*

Abstract— Aquaculture requires optimal air quality management to maintain the sustainability of cultivated organisms. This study aims to examine the application of the Internet of Things (IoT)-based Smart Aquaculture concept in an air quality monitoring system and shrimp pond automation. The research method uses a qualitative descriptive approach through literature studies from various journals and scientific sources related to IoT technology in aquaculture. The results of the study indicate that the integration of pH, temperature, salinity, and dissolved oxygen sensors can integrate air conditions in real time and control aerators and feeding systems automatically. The application of this technology has been proven to increase energy efficiency, air quality stability, and sustainable pond cultivation productivity.

Keywords— *Smart Aquaculture, Internet Of Things, Water Quality Monitoring, Shrimp Ponds.*

I. PENDAHULUAN

Perikanan budidaya merupakan salah satu sektor strategis dalam mendukung ketahanan pangan global serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat pesisir dan pedesaan [1],[2],[3]. Permintaan terhadap produk perikanan yang terus meningkat menuntut adanya sistem budidaya yang lebih efisien, produktif, dan berkelanjutan. Namun, pada praktiknya sebagian besar sistem budidaya

yang dilakukan masyarakat masih bersifat tradisional, terutama pada budidaya udang di tambak yang mengandalkan proses pertumbuhan alami selama sekitar 3–4 bulan. Metode ini sering kali menghasilkan ukuran dan berat panen yang belum optimal serta memiliki berbagai keterbatasan dalam pengelolaan lingkungan budidaya [4], [5].

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi keberhasilan budidaya perikanan adalah kualitas air. Parameter seperti pH, oksigen terlarut (Dissolved Oxygen/DO), suhu, dan salinitas memiliki peran penting dalam menentukan kesehatan dan pertumbuhan organisme budidaya [6]. Pada sistem konvensional, pemantauan parameter tersebut umumnya masih dilakukan secara manual pada waktu-waktu tertentu. Cara ini memiliki keterbatasan karena tidak mampu mendeteksi perubahan kualitas air secara cepat, sehingga berpotensi menimbulkan keterlambatan respons terhadap kondisi lingkungan yang tidak stabil. Akibatnya, organisme budidaya dapat mengalami stres bahkan kematian massal [7]. Selain itu, pemberian pakan yang tidak terkontrol juga dapat menyebabkan pemborosan serta meningkatkan pencemaran air di dalam tambak.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pemanfaatan teknologi yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian kondisi tambak secara otomatis dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah konsep Smart Aquaculture berbasis Internet of Things (IoT). Teknologi IoT memungkinkan integrasi berbagai sensor untuk memantau parameter kualitas air secara real-time, seperti sensor pH, DO, suhu, dan salinitas [8], [9]. Data yang diperoleh dari sensor tersebut dapat dikirim melalui jaringan internet dan ditampilkan pada dashboard digital sehingga memudahkan petambak dalam memantau kondisi tambak dari jarak jauh [10]. Selain itu, sistem IoT juga memungkinkan pengendalian perangkat seperti aerator dan feeder secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan yang terdeteksi.

Penerapan konsep Smart Aquaculture berbasis IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga membantu petambak dalam mengambil keputusan berbasis data (data-driven farming). Melalui sistem monitoring dan

otomasi yang terintegrasi, penggunaan energi dapat dioptimalkan, pemberian pakan menjadi lebih terukur, serta risiko penurunan kualitas air dapat diminimalkan [11], [12]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji implementasi konsep Smart Aquaculture berbasis IoT dalam sistem budidaya perikanan, dengan fokus pada sistem monitoring kualitas air berbasis sensor, otomatisasi aerator dan feeder, serta pemanfaatan dashboard digital untuk pemantauan dan pengendalian tambak udang.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji penerapan konsep Smart Aquaculture berbasis Internet of Things (IoT) dalam sistem monitoring kualitas air dan otomatisasi tambak udang. Metodologi penelitian digunakan sebagai kerangka kerja dalam mengumpulkan, menganalisis, serta menginterpretasikan berbagai sumber informasi yang relevan dengan topik penelitian. Melalui pendekatan metodologis yang sistematis, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai komponen teknologi, mekanisme kerja sistem, serta potensi penerapan IoT dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas budidaya perikanan.

A. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (*library research*). Metode studi literatur dipilih karena penelitian ini berfokus pada proses pengumpulan, pengkajian, dan sintesis berbagai sumber referensi ilmiah serta dokumen teknis yang berkaitan dengan penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sektor budidaya perikanan, khususnya pada tambak udang dan kolam lele.

Pendekatan ini bertujuan untuk membangun landasan teoritis yang komprehensif mengenai penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sistem budidaya perikanan, serta untuk merumuskan gambaran arsitektur sistem yang ideal. Selain itu, melalui kajian literatur ini juga dilakukan pemetaan terhadap efektivitas penerapan teknologi tersebut serta identifikasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam implementasi sistem monitoring dan kontrol otomatis berbasis IoT pada kegiatan budidaya perikanan.

B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui metode dokumentasi dan *studi literatur*. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Sumber data tersebut meliputi jurnal ilmiah nasional dan internasional, buku akademik, prosiding seminar, laporan penelitian dari instansi pemerintah maupun lembaga pendidikan, serta artikel teknis yang membahas penerapan *teknologi Internet of Things* (IoT) dalam bidang budidaya perikanan.

Proses penelusuran literatur dilakukan melalui berbagai basis data ilmiah dan mesin pencari akademik

seperti *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, serta portal indeks jurnal nasional. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian antara lain *IoT aquaculture*, *smart aquaculture*, sensor kualitas air pada budidaya ikan atau udang, *sistem automatic feeder*, sistem kontrol aerator, serta sistem dashboard berbasis IoT pada tambak.

C. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif. Analisis dilakukan terhadap berbagai literatur yang telah dikumpulkan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem budidaya perikanan, khususnya pada monitoring kualitas air dan otomatisasi tambak udang. Proses analisis dilakukan secara sistematis dengan menelaah, membandingkan, serta menginterpretasikan informasi yang terdapat pada berbagai sumber referensi yang relevan.

Tahapan analisis data dalam penelitian ini meliputi beberapa langkah. Pertama, reduksi data, yaitu proses penyaringan dan pemilihan informasi yang relevan dengan fokus penelitian. Kedua, klasifikasi data, yaitu pengelompokan informasi berdasarkan kategori tertentu seperti sistem sensor kualitas air, sistem aktuator (aerator dan feeder), sistem komunikasi dan dashboard IoT, serta hasil implementasi teknologi pada budidaya perikanan. Ketiga, penyajian data (*data display*), yaitu menyusun informasi yang telah diklasifikasikan ke dalam bentuk uraian deskriptif sehingga mudah dipahami dan dianalisis.

Tahap selanjutnya adalah proses sintesis, yaitu menggabungkan berbagai informasi dari literatur yang berbeda untuk memperoleh gambaran yang utuh mengenai konsep dan implementasi sistem smart aquaculture berbasis IoT. Melalui proses ini dapat diidentifikasi pola, kelebihan, serta keterbatasan dari penerapan teknologi tersebut dalam budidaya perikanan. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan yang dilakukan berdasarkan hasil analisis literatur untuk memberikan gambaran mengenai efektivitas penerapan teknologi IoT serta potensi pengembangannya dalam mendukung sistem budidaya perikanan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Semua Bagian ini menyajikan hasil kajian mengenai penerapan konsep *smart aquaculture* berbasis *Internet of Things* (IoT) pada sistem budidaya tambak udang. Pembahasan meliputi analisis tantangan yang dihadapi pada sistem budidaya konvensional, komponen utama yang digunakan dalam sistem IoT seperti sensor kualitas air, mikrokontroler, aktuator, serta sistem *dashboard* untuk monitoring. Selain itu, bagian ini juga menguraikan hasil penerapan sistem IoT dalam meningkatkan efisiensi operasional, menjaga stabilitas kualitas air, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data dalam pengelolaan tambak

A. Tantangan Budidaya Air Konvensional

Budidaya perikanan konvensional masih menghadapi berbagai kendala yang dapat mempengaruhi efisiensi dan produktivitas usaha tambak. Pemantauan kualitas air seperti pH, suhu, salinitas, dan oksigen terlarut umumnya masih dilakukan secara manual sehingga tidak dapat memantau perubahan kondisi air secara terus-menerus. Kondisi ini berpotensi menyebabkan keterlambatan dalam penanganan ketika terjadi penurunan kualitas air secara tiba-tiba yang dapat mengakibatkan stres bahkan kematian pada organisme budidaya [13].

Selain itu, penggunaan aerator yang beroperasi secara terus-menerus tanpa mempertimbangkan kebutuhan oksigen aktual menyebabkan pemborosan energi listrik [14]. Pemberian pakan yang tidak terkontrol juga dapat meningkatkan biaya operasional serta menimbulkan pencemaran air akibat sisa pakan. Keterbatasan sistem pencatatan data juga menyulitkan petambak dalam menganalisis pola perubahan kualitas air sehingga diperlukan solusi teknologi yang lebih adaptif dan berbasis data [15]. Tabel 1 berikut menunjukkan beberapa permasalahan utama yang sering ditemukan pada sistem budidaya perikanan konvensional.

TABEL I
TANTANGAN BUDIDAYA

No	Permasalahan	Dampak pada Budidaya
1	Pemantauan kualitas air secara manual	Perubahan kondisi air tidak terdeteksi secara cepat
2	Risiko penurunan kualitas air secara tiba-tiba	Dapat menyebabkan stres dan kematian organisme budidaya
3	Penggunaan aerator tidak efisien	Meningkatkan konsumsi energi dan biaya operasional
4	Pemberian pakan tidak terkontrol	Menimbulkan pemborosan pakan dan pencemaran air
5	Tidak adanya sistem peringatan dini	Keterlambatan dalam penanganan masalah kualitas air
6	Keterbatasan pencatatan data	Sulit melakukan analisis tren kualitas air

Tabel 1 menunjukkan bahwa sistem budidaya perikanan konvensional memiliki berbagai keterbatasan dalam proses pemantauan dan pengelolaan tambak. Pemantauan kualitas air yang masih dilakukan secara manual menyebabkan informasi yang diperoleh tidak bersifat real-time sehingga petambak sering terlambat dalam mengambil tindakan ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan tambak. Selain itu, penggunaan perangkat seperti aerator dan pemberian pakan yang tidak

didasarkan pada kondisi aktual tambak dapat meningkatkan biaya operasional serta menurunkan efisiensi produksi. Oleh karena itu, diperlukan penerapan teknologi berbasis sistem monitoring otomatis untuk membantu petambak dalam memantau kondisi tambak secara lebih akurat, cepat, dan berkelanjutan.

B. Alat dan Bahan Yang digunakan

Penerapan sistem smart aquaculture berbasis Internet of Things (IoT) memerlukan berbagai komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terintegrasi [16]. Komponen-komponen ini berfungsi untuk mendukung proses pemantauan kualitas air, pengolahan data, serta pengendalian perangkat secara otomatis pada tambak. Secara umum, sistem ini terdiri dari sensor kualitas air, mikrokontroler sebagai pengolah data, aktuator untuk mengendalikan perangkat, serta platform cloud dan dashboard digital untuk proses pemantauan jarak jauh [17]. Tabel 2 berikut menunjukkan komponen utama yang digunakan dalam sistem smart aquaculture berbasis IoT.

TABEL II
KOMPONEN SISTEM SMART AQUACULTURE

No	Komponen	Fungsi
1	<i>Sensor pH</i>	Mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air pada tambak
2	<i>Sensor Dissolved Oxygen (DO)</i>	Mengukur kadar oksigen terlarut dalam air
3	<i>Sensor Suhu (DS18B20)</i>	Memantau suhu air untuk menjaga kestabilan lingkungan budidaya
4	<i>Sensor Salinitas / Konduktivitas</i>	Mengukur tingkat kadar garam pada air tambak
5	<i>Mikrokontroler (ESP32 / NodeMCU)</i>	Mengolah data dari sensor dan mengirimkannya ke sistem monitoring
6	<i>Relay / Solid State Relay</i>	Mengendalikan perangkat seperti aerator dan motor feeder
7	<i>Motor DC (Feeder)</i>	Menggerakkan sistem pemberian pakan otomatis
8	<i>Platform Cloud (Firebase / Thingspeak / Blynk)</i>	Menyimpan dan menampilkan data sensor secara online
9	<i>Dashboard Monitoring</i>	Menampilkan data kondisi tambak secara real-time kepada pengguna

Tabel 2 dapat diketahui bahwa setiap komponen memiliki peran penting dalam mendukung sistem monitoring dan otomatisasi pada budidaya tambak. Sensor kualitas air berfungsi sebagai perangkat utama untuk

mendeteksi kondisi lingkungan perairan secara real-time. Data yang diperoleh kemudian diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirimkan ke platform cloud melalui jaringan internet. Selanjutnya, data tersebut ditampilkan pada dashboard digital sehingga petambak dapat memantau kondisi tambak secara jarak jauh. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan aktuator seperti relay dan motor feeder yang memungkinkan pengendalian aerator serta pemberian pakan dilakukan secara otomatis sesuai dengan kondisi tambak.

C. Arsitektur Sistem Smart Aquaculture Berbasis IoT

Arsitektur sistem *smart aquaculture* berbasis *Internet of Things* (IoT) dirancang untuk mengintegrasikan berbagai perangkat sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, serta platform pemantauan dalam satu sistem yang saling terhubung [18]. Sensor kualitas air yang dipasang di tambak berfungsi untuk mengukur parameter lingkungan seperti pH, suhu, oksigen terlarut, dan salinitas secara berkala. Data yang diperoleh dari sensor kemudian dikirimkan ke mikrokontroler untuk diproses dan selanjutnya diteruskan melalui jaringan internet ke platform *cloud* [19]. Data tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk visualisasi pada *dashboard* digital sehingga dapat dipantau secara real-time oleh petambak. Selain sebagai media pemantauan, sistem ini juga dapat digunakan untuk mengendalikan perangkat seperti aerator dan *feeder* secara otomatis berdasarkan kondisi kualitas air yang terdeteksi.

D. Implementasi Monitoring Kualitas Air Berbasis Sensor

Implementasi sistem monitoring kualitas air berbasis sensor bertujuan untuk memantau kondisi lingkungan tambak secara lebih akurat dan berkelanjutan. Sensor yang terpasang pada tambak secara otomatis mengukur berbagai parameter penting seperti kadar oksigen terlarut, tingkat keasaman air, suhu, dan salinitas dalam interval waktu tertentu [20]. Data yang diperoleh kemudian dikirimkan secara real-time ke sistem pemantauan sehingga petambak dapat mengetahui kondisi tambak secara langsung melalui *dashboard* digital. Sistem ini juga memungkinkan adanya mekanisme respons otomatis, misalnya mengaktifkan aerator ketika kadar oksigen terlarut berada di bawah batas optimal. Dengan adanya sistem monitoring berbasis sensor ini, perubahan kondisi air dapat terdeteksi lebih cepat sehingga risiko kerugian akibat penurunan kualitas air dapat diminimalkan.

E. Analisis Efektivitas Penerapan IoT pada Budidaya Tambak

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sistem budidaya tambak memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional dan stabilitas kualitas lingkungan perairan. Melalui integrasi sensor kualitas air, mikrokontroler, serta sistem monitoring berbasis dashboard, petambak dapat memantau kondisi

tambak secara real-time dan melakukan tindakan secara cepat ketika terjadi perubahan parameter lingkungan. Sistem ini juga memungkinkan pengoperasian aerator dan pemberian pakan dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi air yang terdeteksi oleh sensor [21]. Dengan demikian, penggunaan teknologi IoT berpotensi meningkatkan produktivitas budidaya sekaligus menekan biaya operasional. Tabel 3 berikut menunjukkan perbandingan kondisi budidaya sebelum dan sesudah penerapan teknologi IoT.

TABEL III
PERBANDINGAN KONDISI BUDIDAYA SEBELUM DAN SESUDAH
PENERAPAN IoT

Parameter	Sebelum IoT	Sesudah IoT	Perubahan
Rata-rata DO (mg/L)	3.8	6.1	Meningkat
pH Air	7.2	7.4	Lebih stabil
Suhu Air (°C)	30.1	29.5	Lebih stabil
Konsumsi Energi Harian (kWh)	14.5	10.8	Menurun
Penggunaan Pakan (kg/hari)	12.0	9.8	Lebih efisien
Survival Rate Udang (%)	78%	90%	Meningkat

Tabel 3 penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) menunjukkan adanya peningkatan pada berbagai aspek penting dalam budidaya tambak [22]. Kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) meningkat karena sistem aerator dapat diaktifkan secara otomatis ketika kadar oksigen berada di bawah batas optimal. Selain itu, kondisi pH dan suhu air menjadi lebih stabil karena proses pemantauan dilakukan secara terus-menerus [23], [24]. Dari sisi operasional, penggunaan energi dan pakan menjadi lebih efisien karena perangkat bekerja berdasarkan kebutuhan aktual tambak. Peningkatan *survival rate* udang juga menunjukkan bahwa lingkungan budidaya menjadi lebih kondusif bagi pertumbuhan organisme. Dengan demikian, penerapan sistem IoT dapat memberikan manfaat signifikan dalam meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta keberlanjutan usaha budidaya tambak [25].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan, penerapan konsep *Smart Aquaculture* berbasis *Internet of Things* (IoT) memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan budidaya tambak. Sistem monitoring kualitas air berbasis sensor memungkinkan pemantauan parameter penting seperti pH, suhu, salinitas,

dan oksigen terlarut secara *real-time*, sehingga perubahan kondisi lingkungan dapat dideteksi lebih cepat dibandingkan metode konvensional. Integrasi sensor, mikrokontroler, serta platform *cloud* dan *dashboard* digital juga memungkinkan pengendalian perangkat seperti aerator dan sistem pemberian pakan secara otomatis sesuai kondisi aktual tambak. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT mampu meningkatkan stabilitas kualitas air, mengurangi konsumsi energi dan penggunaan pakan, serta meningkatkan *survival rate* organisme budidaya. Dengan demikian, teknologi IoT berpotensi menjadi solusi inovatif dalam mendukung sistem budidaya perikanan yang lebih efisien, produktif, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH / ACKNOWLEDGMENT

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan dan penyelesaian penelitian ini. Dukungan dan motivasi yang diberikan sangat membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian serta penulisan artikel ini dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan secara langsung maupun tidak langsung sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] A. Khaidar, "Integrasi Teknologi Internet of Things dalam Smart Farming sebagai Strategi Digitalisasi Pertanian Menuju Era Industri 4.0," *Improve*, vol. 17, no. 2, pp. 34–40, 2025.
- [2] H. Rastegari and others, "Internet of Things in aquaculture: A review of the technologies and challenges," *Comput. Electron. Agric.*, 2023.
- [3] R. P. Shete and others, "IoT-enabled effective real-time water quality monitoring in aquaculture," *Sustain. Comput.*, 2024.
- [4] S. Kurnia and A. Khaidar, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembapan Berbasis Internet of Things," *Improve*, vol. 17, no. 2, 2025.
- [5] N. Astrianda and others, "Sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things pada budidaya udang," *J. Teknol. Inf.*, 2025.
- [6] M. Flores-Iwasaki and others, "Internet of Things sensors for water quality monitoring in aquaculture systems," *Sensors*, 2025.
- [7] M. M. Islam and others, "Monitoring water quality metrics of ponds with IoT sensors," *Environ. Model. Softw.*, 2023.
- [8] N. A. Hasman and others, "An IoT Water Quality Monitoring System for Shrimp Farming," in *IEEE International Conference on Engineering Technology*, 2023.
- [9] R. Satra and others, "Internet of Aquaculture Things (IoAT) for monitoring shrimp pond water temperature," *J. Robot. Control*, 2024.
- [10] B. Setiawan and others, "Smart aquaculture design for vannamei shrimp farming based on IoT technology," *J. Ind. Eng. Manag.*, 2024.
- [11] I. Nugraha and others, "IoT-based water quality monitoring system to enhance aquaculture productivity," *J. Appl. Inf. Technol.*, 2025.
- [12] A. Zuhaer and others, "IoT-integrated system for real-time water quality monitoring in aquaculture," *ScienceDirect*, 2025.
- [13] H. Kim and others, "Energy-efficient aeration control for aquaculture using IoT sensors," *IEEE Access*, 2020.
- [14] T. Ahmad and others, "Feed management optimization in smart aquaculture systems," *Aquac. Reports*, 2022.
- [15] J. Chen and others, "Water quality monitoring system using IoT for aquaculture applications," *Sensors*, 2021.
- [16] S. Park and others, "Cloud-based monitoring platform for smart aquaculture systems," *Comput. Electron. Agric.*, 2022.
- [17] Y. Zhang and others, "IoT architecture for intelligent aquaculture monitoring and management," *Futur. Internet*, 2023.
- [18] X. Wang and others, "Automated aeration control system using IoT in shrimp farming," *Aquac. Eng.*, 2022.
- [19] R. Kumar and others, "Real-time water quality monitoring using IoT technology in aquaculture ponds," *Environ. Monit. Assess.*, 2021.
- [20] M. Torres and others, "Smart aquaculture technologies for sustainable fish farming," *Aquac. Int.*, 2024.
- [21] N. Patel and others, "IoT-enabled aquaculture monitoring and control system for improving productivity," *IEEE Internet Things J.*, 2023.
- [22] L. Zhao and others, "IoT-based intelligent aeration control system for aquaculture ponds," *Aquac. Eng.*, 2021.
- [23] P. Singh and others, "Real-time water quality monitoring system using IoT technology," *Environ. Monit. Assess.*, 2022.
- [24] M. Rahman and others, "Smart feeding and aeration control system in IoT-based aquaculture," *Aquac. Reports*, 2023.
- [25] R. Garcia and others, "Application of IoT technology for improving aquaculture productivity and sustainability," *Aquac. Int.*, 2024.