

Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air Kolam Berbasis IoT**Nita Nurdiana^{1*}, Emidiana², M. Saleh Al Amin³**^{1,2,3}*Prodi Teknik Elektro, Universitas PGRI Palembang*nurdiana78@unvpgri-palembang.ac.id^{1*}, emidiana@univpgri-palembang.ac.id², salehamin@univpgri-palembang.ac.id³*Received 21 November 2025 | Revised 19 Februari 2026 | Accepted 24 Februari 2026***ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas air kolam berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan pemantauan parameter lingkungan perairan secara real-time, akurat, dan berkelanjutan guna mendukung kegiatan budidaya ikan air tawar. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama yang terintegrasi dengan sensor DS18B20 untuk pengukuran suhu, sensor pH 4502C untuk derajat keasaman, serta sensor TDS Meter v1.0 untuk mengukur total padatan terlarut (TDS). Pengujian sistem dilakukan selama tujuh hari berturut-turut pada kolam air tawar dengan penempatan sensor pada dua kedalaman berbeda, yaitu 20 cm dan 30 cm, untuk menganalisis variasi kualitas air secara vertikal. Data hasil pengukuran dikirimkan secara nirkabel melalui jaringan WiFi dan ditampilkan pada platform IoT dalam bentuk data numerik dan grafik historis secara real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu air pada lapisan permukaan lebih fluktuatif dibandingkan kedalaman 30 cm akibat pengaruh langsung radiasi matahari, sementara nilai pH berada pada kisaran netral dan cenderung lebih tinggi di permukaan kolam yang dipengaruhi oleh aktivitas fotosintesis organisme air. Nilai TDS terukur lebih tinggi pada kedalaman 30 cm, yang mengindikasikan adanya akumulasi padatan terlarut di lapisan bawah kolam. Pengujian akurasi sensor menunjukkan tingkat kesalahan sebesar 1,09% untuk suhu, 1,39% untuk pH, dan 3,70% untuk TDS, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring kualitas air berbasis ESP32 memiliki kinerja yang baik, stabil, dan layak diterapkan sebagai solusi pemantauan kualitas air kolam secara efektif.

Kata kunci: Monitoring Kualitas Air, ESP-32, pH Sensor, TDS Sensor, Akuakultur

This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based water quality monitoring system capable of providing real-time, accurate, and continuous measurements to support freshwater aquaculture activities. The system was developed using an ESP32 microcontroller as the main processing unit, integrated with a DS18B20 sensor for temperature measurement, a pH 4502C sensor for acidity level monitoring, and a TDS Meter v1.0 sensor to measure total dissolved solids (TDS). System testing was conducted over a period of seven consecutive days in a freshwater pond, with sensors installed at two different depths, namely 20 cm and 30 cm, to analyze vertical variations in water quality parameters. Measurement data were transmitted wirelessly via a WiFi network and displayed on an IoT platform in the form of real-time numerical data and historical graphical visualization. The results indicate that water temperature at the surface layer exhibited higher fluctuations compared to the 30 cm depth due to direct solar radiation effects, while pH values remained within a neutral range and tended to be higher near the surface as a result of photosynthetic activity by aquatic organisms. Furthermore, TDS values were consistently higher at the 30 cm depth, indicating the accumulation of dissolved solids in the lower water layer. Sensor accuracy testing revealed low error rates of 1.09% for temperature, 1.39% for pH, and 3.70% for TDS, demonstrating that the proposed ESP32-based monitoring system provides reliable, stable, and accurate measurements. Overall, the developed system is considered suitable for real-time water quality monitoring applications in freshwater aquaculture environments.

Keywords: Water Quality Monitoring, ESP32, pH Sensor, TDS Sensor, Aquaculture

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan wilayah perairan yang luas memiliki potensi besar dalam pengembangan sektor akuakultur. Transformasi sektor ini semakin dipercepat oleh adopsi teknologi digital, khususnya sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan pengawasan kualitas air secara *real-time* dan terintegrasi (Gao et al., 2023; Haque et al., 2020; López-Vargas et al., 2021). Implementasi teknologi ini menjadi penting karena peningkatan intensifikasi budidaya menuntut sistem pengelolaan kualitas air yang lebih presisi dan berbasis data. Dalam kegiatan budidaya ikan air tawar, kualitas air merupakan faktor krusial yang secara langsung memengaruhi kesehatan ikan, efisiensi pakan, serta produktivitas sistem budidaya. Parameter utama seperti suhu, pH, dan *total dissolved solids* (TDS) berperan dalam menjaga keseimbangan fisiologis organisme akuatik. Perubahan suhu yang signifikan dapat memicu stres termal dan

gangguan metabolisme, sedangkan fluktuasi pH memengaruhi keseimbangan ionik dan toksisitas senyawa terlarut (Alahi & Mukhopadhyay, 2020; Rahman et al., 2023). Selain itu, peningkatan nilai TDS sering dikaitkan dengan akumulasi bahan organik dan residu pakan yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan budidaya (Kumar et al., 2023). Meskipun demikian, pemantauan kualitas air di tingkat pembudidaya masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat ukur portabel. Pendekatan ini memiliki keterbatasan berupa ketidakkontinuan data, potensi kesalahan pembacaan, serta ketidakmampuan mendeteksi perubahan parameter secara cepat dan simultan. Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko kegagalan produksi akibat keterlambatan respons terhadap penurunan kualitas air (Olatunji & Osho, 2022; Sultana & Hasan, 2021).

Seiring perkembangan teknologi, sistem monitoring berbasis IoT telah banyak dikembangkan dengan memanfaatkan mikrokontroler seperti ESP32 yang terintegrasi dengan sensor suhu, pH, dan TDS untuk pengiriman data berbasis cloud (Chen et al., 2023; Khan et al., 2021; Zhou et al., 2022). Pendekatan ini memungkinkan visualisasi data historis, notifikasi dini, serta integrasi dengan sistem analitik berbasis edge maupun cloud computing (Banna et al., 2022; Singh et al., 2023). Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada aspek arsitektur sistem dan transmisi data tanpa mengevaluasi variasi distribusi parameter kualitas air berdasarkan perbedaan kedalaman sensor dalam kolam air. Secara ekologis, kolam budidaya dapat mengalami stratifikasi termal ringan dan distribusi vertikal zat terlarut akibat perbedaan intensitas radiasi matahari, aktivitas fotosintesis, serta sedimentasi partikel organik (Li et al., 2022; Tang et al., 2024). Variasi ini berpotensi menyebabkan perbedaan karakteristik suhu, pH, dan TDS antar lapisan air, sehingga pengukuran pada satu titik kedalaman belum tentu merepresentasikan kondisi keseluruhan kolam. Selain itu, studi yang secara khusus mengevaluasi stabilitas dan akurasi sensor low-cost dalam kondisi operasional lapangan masih terbatas (Sivamani & Muthuraman, 2022; Yadav & Kumar, 2023).

Penelitian sebelumnya belum secara eksplisit mengkaji pengaruh variasi kedalaman sensor terhadap karakteristik suhu, pH, dan TDS dalam sistem monitoring IoT berbasis ESP32 pada lingkungan budidaya nyata. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis komparatif multi-depth monitoring serta evaluasi performa sensor low-cost dalam kondisi operasional kolam air tawar. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi analisis distribusi vertikal parameter kualitas air dengan sistem monitoring real-time berbasis cloud, sehingga menghasilkan pendekatan yang lebih representatif dan aplikatif untuk mendukung pengelolaan budidaya ikan air tawar secara presisi.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan pendekatan eksperimen berbasis pengembangan sistem monitoring kualitas air kolam menggunakan arsitektur *Internet of Things* (IoT).

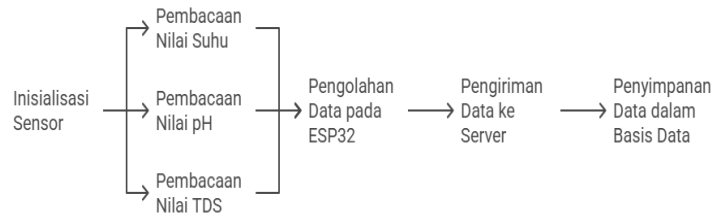
A. Desain dan Arsitektur Sistem

Sistem monitoring dikembangkan menggunakan arsitektur IoT empat layer yang terdiri atas: (1) layer sensor, (2) layer pemrosesan data, (3) layer komunikasi, dan (4) layer aplikasi berbasis cloud. Layer sensor terdiri atas Sensor DS18B20 untuk pengukuran suhu; Sensor pH 4502C untuk derajat keasaman; Sensor TDS Meter v1.0 untuk total padatan terlarut. Arsitektur empat layer yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada model arsitektur IoT modern untuk aplikasi akuakultur yang mengintegrasikan sensor *node*, *edge processing*, komunikasi nirkabel, dan *cloud analytics* (Gao et al., 2023; Singh et al., 2023). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menguji performa sistem pada satu kedalaman sensor (Abdel-Rahman et al., 2021; Sultana & Hasan, 2021), penelitian ini menambahkan pendekatan *multi-depth monitoring* sebagai bagian dari evaluasi distribusi vertikal parameter kualitas air.

Data sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama. ESP32 memiliki Analog-to-Digital Converter (ADC) 12-bit dengan resolusi 4096 level konversi, yang memungkinkan pembacaan sinyal analog dengan presisi yang memadai untuk aplikasi monitoring kualitas air. ESP32 dipilih karena mendukung konektivitas WiFi terintegrasi serta kompatibel dengan berbagai platform IoT berbasis cloud.

Layer komunikasi menggunakan jaringan WiFi IEEE 802.11 b/g/n untuk mengirimkan data ke platform *Blynk* IoT. Integrasi dilakukan melalui protokol TCP/IP menggunakan autentikasi token perangkat. Data dikirimkan setiap 10 detik melalui virtual pin yang telah dikonfigurasi pada *dashboard* aplikasi.

Platform *Blynk* menyediakan (1) Visualisasi grafik historis (2) Monitoring numerik *real-time* (3) Penyimpanan data berbasis cloud (4) Notifikasi otomatis ketika parameter melewati ambang batas. Pendekatan ini mendukung sistem monitoring berbasis *mobile computing* yang banyak diterapkan dalam sistem IoT akuakultur modern (Rahman et al., 2023; Zhou et al., 2022). Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis IoT

B. Spesifikasi Perangkat dan Evaluasi Sensor

Spesifikasi teknis perangkat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat

Komponen	Rentang Ukur	Akurasi Pabrikan	Resolusi	Tegangan Kerja
DS18B20	-55–125°C	±0.5°C	0.0625°C	3–5.5 V
pH 4502C	0–14 pH	±0.1 pH	0.01 pH	5 V
TDS v1.0	0–1000 ppm	±10% F.S	1 ppm	3.3–5 V
ESP32	ADC 12-bit	±2 LSB	4096 level	3–3.6 V

Kalibrasi dan Pengujian Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat ukur standar laboratorium, yaitu:

- Termometer digital laboratorium bersertifikat (untuk suhu)
- pH meter digital terkalibrasi dengan larutan buffer pH 4,00 dan 7,00
- TDS meter standar laboratorium

Setiap pengukuran dilakukan sebanyak lima kali ulangan untuk memperoleh nilai rata-rata pembacaan, dimana persentase error dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{Nilai Sensor} - \text{Nilai Referensi}|}{\text{Nilai Referensi}} \times 100\% \quad (1)$$

Evaluasi akurasi dan stabilitas sensor low-cost menjadi aspek penting dalam sistem IoT akuakultur karena sensor analog rentan terhadap noise tegangan dan fluktuasi lingkungan (Sivamani & Muthuraman, 2022; Yadav & Kumar, 2023). Metode pengujian komparatif terhadap alat referensi laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini sejalan dengan pendekatan kalibrasi yang direkomendasikan oleh (Islam et al., 2021; Kumar et al., 2023). Oleh karena itu, pengujian stabilitas dilakukan secara berulang untuk menilai konsistensi pembacaan dalam interval waktu tertentu.

C. Prosedur Eksperimen dan Multi-Depth Monitoring

Pengujian dilakukan pada kolam air tawar dengan kedalaman ±75 cm selama tujuh hari berturut-turut. Sensor ditempatkan pada dua kedalaman berbeda, yaitu 20 cm (lapisan permukaan) dan 30 cm (lapisan tengah), untuk menganalisis distribusi vertikal parameter kualitas air.

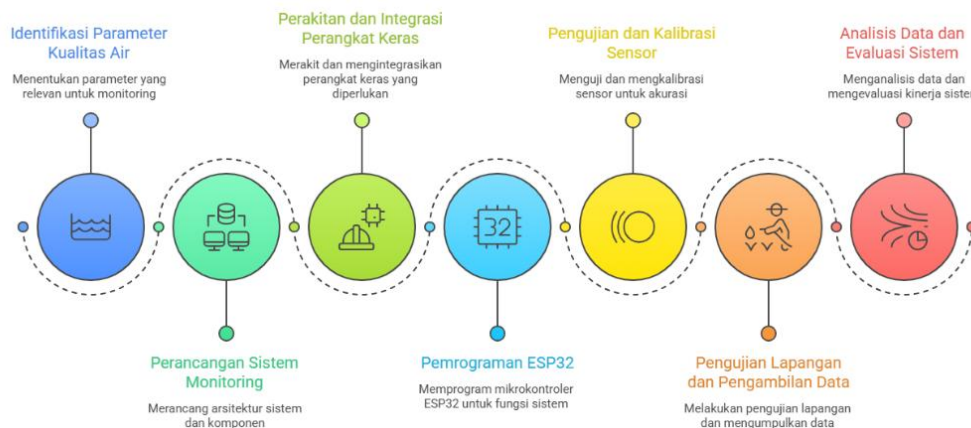
Pendekatan multi-depth monitoring digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya stratifikasi termal dan akumulasi zat terlarut yang dapat menyebabkan variasi parameter secara vertikal (Li et al., 2022; Tang et al., 2024). Pengambilan data dilakukan pada dua waktu pengamatan utama, yaitu pukul 08.00 dan 15.00, untuk mengamati pengaruh variasi radiasi matahari terhadap perubahan suhu dan pH.

Data dikirimkan setiap 10 detik ke platform cloud dan disimpan dalam bentuk data numerik serta grafik historis. Analisis dilakukan secara:

- Komparatif antar kedalaman
- Komparatif antar waktu (pagi–sore)
- Evaluasi stabilitas dan konsistensi sensor

Pendekatan ini dirancang untuk mengevaluasi distribusi vertikal parameter kualitas air serta menguji stabilitas sensor low-cost dalam kondisi budidaya nyata, sehingga mendukung kontribusi penelitian terhadap pengembangan sistem monitoring IoT berbasis multi-depth. Metode analisis ini sejalan dengan pendekatan evaluasi sistem IoT real-time dalam aplikasi akuakultur modern (Olatunji & Osho, 2022; Rahman et al., 2023). Pendekatan multi-depth monitoring dalam penelitian ini juga sejalan dengan sistem monitoring multi-layer yang dikembangkan oleh (Nguyen et al., 2024) yang menunjukkan pentingnya pengamatan distribusi vertikal

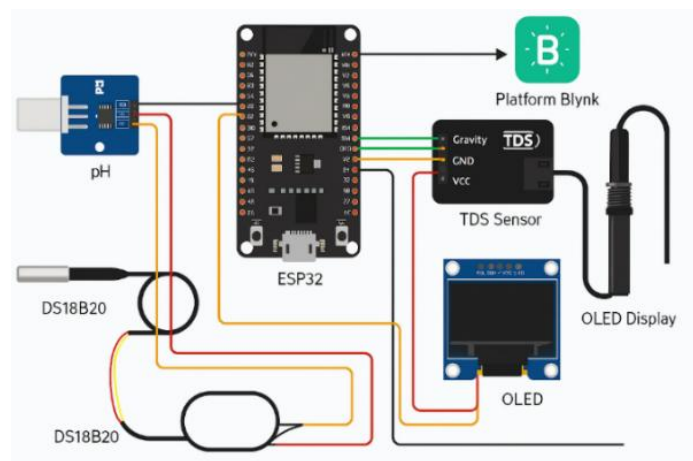
parameter kualitas air dalam sistem akuakultur modern. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem monitoring kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) pada kolam air tawar dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan tiga jenis sensor utama, yaitu sensor suhu DS18B20, sensor pH analog pH4502C, serta sensor TDS Meter v1.0. Seluruh sensor direkayasa untuk bekerja secara terintegrasi dalam sistem pemantauan kondisi air secara real-time.



Gambar 3. Wiring Diagram Rangkaian Sistem

A. Pengujian Sistem Perangkat Keras

Konfigurasi dan integrasi komponen sistem ditunjukkan pada Gambar 3 yang memperlihatkan wiring diagram rangkaian sistem monitoring. Pengujian awal dilakukan untuk memastikan seluruh komponen (mikrokontroler, sensor, regulator daya, dan modul komunikasi) berfungsi dengan baik sebelum diterapkan pada pengujian lapangan.

Pengujian Tegangan Suplai ESP32

Hasil pengujian tegangan suplai ditunjukkan pada Tabel 2. Tegangan input adaptor sebesar 5,01 V dan keluaran regulator ESP32 sebesar 3,29 V berada dalam rentang kerja ideal (3,0–3,6 V). Ripple tegangan sebesar 32 mV tergolong kecil dan masih dalam batas aman.

Tabel 2. Pengujian Tegangan Suplai ESP32

Parameter	Nilai
Tegangan input adaptor	5.01 V
Tegangan keluaran regulator ESP32	3.29 V
Ripple tegangan	32 mV

Stabilitas suplai daya menjadi faktor penting karena sensor analog seperti pH4502C dan TDS v1.0 sensitif terhadap fluktuasi tegangan yang dapat memengaruhi pembacaan ADC 12-bit pada ESP32. Hasil ini menunjukkan sistem memiliki kestabilan catu daya yang memadai untuk mendukung pembacaan sensor secara konsisten.

B. Pengujian akurasi dan Stabilitas Sensor

1. Sensor Suhu DS18B20

Tabel 3 menunjukan hasil pengujian terhadap Sensor Suhu (DS18B20). Hasil pengujian menunjukkan selisih pembacaan berkisar antara 0,02–0,05°C dengan error rata-rata 0,11% dan akurasi 99,89%. Nilai ini menunjukkan presisi tinggi dan stabilitas pembacaan yang sangat baik. Dibandingkan beberapa sistem monitoring IoT berbasis mikrokontroler sejenis, error suhu pada penelitian ini tergolong rendah. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi sensor digital DS18B20 dengan ESP32 memberikan performa pembacaan yang stabil dalam kondisi lapangan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor Suhu (DS18B20)

Pengujian	Manual (°C)	Sensor (°C)	Selisih	Error %	Akurasi %
1	26.50	26.55	0.05	0.2	99.8
2	27.80	27.84	0.04	0.1	99.9
3	29.30	29.33	0.03	0.1	99.9
4	31.00	31.04	0.04	0.1	99.9
5	30.20	30.23	0.03	0.1	99.9
6	28.90	28.92	0.02	0.1	99.9
7	25.40	25.43	0.03	0.1	99.9
Rata-rata	—	—	0.0343°C	0.1143%	99.8857%

2. Sensor pH 4502C

Pada pengujian Sensor pH yang di tampilkan pada tabel 4 menunjukkan selisih 0,01–0,04 dengan error rata-rata 0,30% dan akurasi 99,70%. Nilai ini masih berada dalam batas toleransi sensor analog low-cost untuk aplikasi monitoring kualitas air. Meskipun sensor pH analog cenderung sensitif terhadap noise dan fluktuasi tegangan, hasil pengujian menunjukkan konsistensi pembacaan yang baik setelah proses kalibrasi menggunakan larutan buffer standar.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sensor pH (4502C)

Pengujian	Manual (°C)	Sensor (°C)	Selisih	Error %	Akurasi %
1	6.60	6.62	0.02	0.3	99.7
2	6.80	6.83	0.03	0.4	99.6
3	7.10	7.13	0.03	0.4	99.6
4	7.40	7.44	0.04	0.5	99.5
5	7.00	7.01	0.01	0.1	99.9
6	6.90	6.92	0.02	0.3	99.7
7	6.50	6.51	0.01	0.1	99.9
Rata-rata	—	—	0.023	0.30%	99.70%

3. Sensor TDS Meter v1.0

Sensor TDS menunjukkan selisih 3–8 ppm dengan error rata-rata 2,30% dan akurasi 97,70%. Nilai error lebih tinggi dibandingkan suhu dan pH karena karakteristik pengukuran konduktivitas sangat dipengaruhi suhu, kondisi probe, dan homogenitas larutan. Namun demikian, tingkat akurasi di atas 97% masih tergolong baik untuk aplikasi monitoring kualitas air budidaya skala lapangan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Sensor TDS

Pengujian	Manual (°C)	Sensor (°C)	Selisih	Error %	Akurasi %
1	180	185	5	2.7	97.3
2	200	204	4	2.0	98.0
3	220	225	5	2.3	97.7
4	260	268	8	3.1	96.9
5	240	245	5	2.1	97.9
6	210	214	4	1.9	98.1
7	150	153	3	2.0	98.0
Rata-rata	—	—	4.86 ppm	2.30%	97.70%

C. Pengujian Kinerja Sensor di Lapangan (Multi-Depth Monitoring)

Pengujian lapangan dilakukan pada kolam dengan kedalaman 75 cm. Sensor dipasang pada dua kedalaman, yaitu 20 cm (lapisan permukaan) dan 30 cm (lapisan tengah). Data diambil dua kali sehari, pukul 08.00 dan 15.00, selama tujuh hari berturut-turut. Meskipun sistem memancarkan data setiap 10 detik, analisis utama menggunakan data berkala tersebut agar lebih mudah diamati dan dianalisis. Data hasil pengukuran disajikan dalam tabel 6-8

Tabel 6. Data Pengujian Sensor Suhu (DS18B20) (°C)

Hari	Pengukuran Pagi (08.00)		Pengukuran Sore 15:00	
	Kedalaman 20cm	Kedalaman 30 cm	Kedalaman 20 cm	Kedalaman 30 cm
1	26.8	26.1	27.9	27.1
2	27.1	26.5	28.1	27.3
3	27.4	26.9	28.6	27.8
4	27.9	27.3	29.2	28.2
5	27.3	26.8	28.0	27.4
6	26.9	26.3	27.7	27.0
7	26.5	26.0	27.3	26.7

Suhu air pada sore hari meningkat 0,8–1,3°C dibandingkan pagi hari akibat radiasi matahari. Kedalaman 20 cm secara konsisten menunjukkan suhu lebih tinggi dibandingkan 30 cm. Hal ini menunjukkan adanya stratifikasi termal ringan. Lapisan permukaan lebih cepat menyerap panas, sedangkan lapisan tengah lebih stabil. Rentang suhu 26,0–29,2°C masih berada dalam kisaran optimal budidaya ikan air tawar (25–32°C). Temuan ini menegaskan bahwa bahkan pada kolam dangkal (± 75 cm), distribusi panas tidak sepenuhnya homogen.

Tabel 7. Data Sensor pH (pH4502C)

Hari	Pengukuran Pagi (08.00)		Pengukuran Sore 15:00	
	Kedalaman 20cm	Kedalaman 30 cm	Kedalaman 20cm	Kedalaman 30 cm
1	6.82	6.70	7.05	6.90
2	6.90	6.75	7.15	6.94
3	7.00	6.82	7.20	6.98
4	7.28	7.05	7.52	7.20
5	7.10	6.88	7.22	7.01
6	6.95	6.80	7.12	6.93
7	6.74	6.62	6.98	6.78

Nilai pH meningkat pada sore hari (6,90–7,52) dibandingkan pagi (6,62–7,28). Kenaikan ini dipengaruhi aktivitas fotosintesis organisme air yang menyerap CO₂ sehingga meningkatkan pH. Kedalaman 20 cm menunjukkan nilai pH lebih tinggi dibandingkan 30 cm karena paparan cahaya lebih besar. Seluruh nilai pH masih berada dalam rentang optimal 6,5–8,5 untuk budidaya ikan air tawar.

Tabel 8. Data Sensor TDS (ppm)

Hari	Pengukuran Pagi (08.00)		Pengukuran Sore 15:00	
	Kedalaman 20cm	Kedalaman 30 cm	Kedalaman 20cm	Kedalaman 30 cm
1	176	198	185	205
2	182	204	189	210
3	187	207	194	214
4	193	213	200	220
5	185	200	192	207
6	181	203	188	211
7	178	195	186	203

Nilai TDS pada kedalaman 30 cm secara konsisten lebih tinggi dibandingkan 20 cm. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi partikel organik, sisa pakan, dan residu metabolik pada lapisan lebih dalam. Peningkatan ringan TDS pada sore hari diduga akibat evaporasi dan aktivitas ikan yang mengaduk sedimen. Temuan ini menunjukkan distribusi zat terlarut dalam kolam tidak merata secara vertikal.

Nilai error rata-rata sensor suhu sebesar 0,11% lebih rendah dibandingkan hasil evaluasi sensor suhu low-cost pada penelitian (Kumar et al., 2023) yang melaporkan error 0,5–1,2% pada kondisi kolam terbuka.

Untuk sensor pH, error 0,30% masih berada di bawah rentang error 0,5–2% yang dilaporkan oleh (Sivamani & Muthuraman, 2022). Sementara itu, error sensor TDS sebesar 2,30% sebanding dengan studi (Yadav & Kumar, 2023) yang menunjukkan variasi error 2–5% pada sensor TDS analog. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki performa kompetitif dibandingkan sistem IoT akuakultur terkini. Pendekatan multi-depth monitoring menunjukkan adanya stratifikasi termal ringan serta distribusi TDS yang berbeda antar lapisan air. Temuan ini sejalan dengan studi (Li et al., 2022; Tang et al., 2024) yang menyatakan bahwa distribusi vertikal parameter kualitas air berpengaruh terhadap stabilitas ekosistem kolam budidaya. Namun, berbeda dengan penelitian tersebut yang menggunakan sensor industri, penelitian ini membuktikan bahwa sensor low-cost berbasis ESP32 juga mampu mendeteksi variasi vertikal secara konsisten.

Secara praktis, informasi distribusi vertikal suhu, pH, dan TDS dapat membantu pembudidaya dalam menentukan strategi aerasi, pemberian pakan, serta manajemen sirkulasi air. Monitoring berbasis cloud melalui Blynk memungkinkan respons cepat terhadap perubahan parameter yang berpotensi memengaruhi kesehatan ikan (Rahman et al., 2023; Zhou et al., 2022). Integrasi model prediksi berbasis machine learning sebagaimana dikembangkan oleh (Zulfiqar et al., 2024) dapat menjadi pengembangan lanjutan sistem ini.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas air kolam berbasis IoT menggunakan ESP32 dan platform Blynk yang mampu memantau suhu, pH, dan TDS secara real-time. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sensor suhu dan pH memiliki tingkat akurasi sangat tinggi (error < 0,5%), sedangkan sensor TDS menunjukkan error rata-rata 2,30%, yang masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi monitoring akuakultur.

Pendekatan multi-depth monitoring pada kedalaman 20 cm dan 30 cm mampu mengidentifikasi variasi vertikal parameter kualitas air, termasuk stratifikasi termal ringan dan perbedaan distribusi TDS. Kontribusi penelitian ini terletak pada evaluasi stabilitas sensor low-cost dalam skema pemantauan multi-kedalaman berbasis cloud, yang memberikan solusi monitoring yang akurat, real-time, dan aplikatif untuk mendukung manajemen budidaya ikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Rahman, E. M., Ahmed, F. B., & Ismail, R. (2021). IoT-based smart water quality monitoring system for aquaculture. *Sensors*, 21(15), 5123. <https://doi.org/10.3390/s21155123>
- Alahi, M. E. E., & Mukhopadhyay, S. C. (2020). Detection methodologies for water quality monitoring: Review of sensors and IoT integration. *IEEE Access*, 8, 28779–28805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971286>
- Banna, M. H. A., Rohani, M. F., & Hossain, M. S. (2022). Cloud-enabled IoT framework for smart aquaculture monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195, 106832. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106832>
- Chen, Y., Li, X., & Wang, J. (2023). Real-time aquaculture water monitoring using ESP32 and cloud platform. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 3321–3332.
- Gao, F., Zhang, H., & Liu, T. (2023). Cloud-integrated IoT system for intelligent aquaculture monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107455. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107455>
- Haque, M. A., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2020). IoT-based smart aquaculture: A review on water quality monitoring systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(9), 150–158.
- Islam, M. T., Rahman, M. M., & Karim, M. R. (2021). Low-cost sensor calibration method for IoT-based aquaculture monitoring. *Measurement*, 177, 109263. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109263>
- Khan, R., Rehman, A. U., & Zafar, S. (2021). Design of ESP32-based water quality monitoring system using cloud computing. *IEEE Access*, 9, 150099–150112. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3123456>

- Kumar, P., Singh, R., & Sharma, V. (2023). Performance evaluation of low-cost water quality sensors in aquaculture ponds. *Measurement*, 211, 112654. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112654>
- Li, X., Wang, Y., & Chen, J. (2022). Thermal stratification and dissolved solids distribution in freshwater aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering*, 96, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102213>
- López-Vargas, A., Fuentes, M., & Vivar, M. (2021). IoT application for real-time monitoring of aquaculture systems. *Sensors*, 21(7), 2332. <https://doi.org/10.3390/s21072332>
- Nguyen, T. H., Tran, Q. H., & Le, D. T. (2024). Multi-depth water quality monitoring system using wireless sensor networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 244. <https://doi.org/10.3390/jmse12020244>
- Olatunji, S. O., & Osho, A. (2022). Smart aquaculture monitoring system based on IoT and cloud computing. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 34, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100708>
- Rahman, M. S., Hasan, M. M., & Islam, M. R. (2023). IoT-enabled real-time water quality monitoring for fish farming. *Aquaculture Reports*, 29, 101502. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101502>
- Singh, D., Verma, A., & Prasad, R. (2023). Cloud-based IoT architecture for aquaculture monitoring. *Future Generation Computer Systems*, 137, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.08.012>
- Sivamani, S., & Muthuraman, S. (2022). Performance evaluation of low-cost water quality sensors for IoT applications. *Measurement*, 194, 111054. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111054>
- Sultana, N., & Hasan, M. (2021). Design and analysis of IoT-based fish pond monitoring system. *IEEE Access*, 9, 116147–116158. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3107564>
- Tang, J., Zhou, Y., & Huang, L. (2024). Vertical water parameter variation in aquaculture ponds under environmental influence. *Aquacultural Engineering*, 104, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2024.102523>
- Yadav, S., & Kumar, N. (2023). Comparative study of water quality sensors for smart aquaculture. *Sensors*, 23(5), 2541. <https://doi.org/10.3390/s23052541>
- Zhou, Q., Li, Z., & Wang, H. (2022). Smart aquaculture system based on edge computing and IoT. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107084>
- Zulfiqar, F., Ahmad, I., & Shah, S. A. (2024). IoT-based water quality prediction and monitoring using machine learning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 145. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12345-6>