



Rancang Bangun Alat Ukur Kualitas Air Sanitasi Berbasis ESP32-C6 dan Internet of Things

Nur Kholis Nafis^{1,*}, Julman Notatema Waruwu¹, Aisyah Putri Harmelia¹, Asri Sarassufi Aisah¹, Daffa Maulana Kindi A.L¹, Purba M. Ahlan Kurniawan¹, Muhammad Reynaldi Ilham¹, Bayu Widodo¹, Mamat Rahmat²

¹ Fakultas Sekolah Vokasi, Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer, IPB University, Bogor, Indonesia

² PT. Matra Kreasi Mandiri, Bogor, Indonesia

Email: ^{1,*}kholisnafis@apps.ipb.ac.id, ²julmanwaruwu@apps.ipb.ac.id, ³aisyahputriharmelia@apps.ipb.ac.id,

⁴asrisarassufi@apps.ipb.ac.id, ⁵dafa_maulanan@apps.ipb.ac.id, ⁶ahlanpurba@apps.ipb.ac.id, ⁷reynaldimuhammad@apps.ipb.ac.id,

⁸bayuwi@apps.ipb.ac.id, ⁹rahmat32@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: kholisnafis@apps.ipb.ac.id

Abstrak—Kualitas air sanitasi merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan masyarakat. Pemantauan kualitas air secara konvensional umumnya memerlukan pengujian laboratorium yang membutuhkan waktu dan biaya relatif tinggi serta tidak dapat memberikan informasi secara real-time. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun alat ukur kualitas air sanitasi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32-C6 yang terintegrasi dengan sensor pH, total dissolved solids (TDS), turbidity, dan suhu. Metode penelitian yang digunakan meliputi perancangan sistem, implementasi perangkat keras, pengujian akurasi sensor, serta pengujian stabilitas melalui pengukuran berulang. Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi, sedangkan pengujian stabilitas dianalisis menggunakan nilai standar deviasi dan tingkat presisi (%RSD). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,24% dan sensor suhu sebesar 2,51%, sedangkan sensor TDS memiliki tingkat kesalahan sebesar 16,92%. Pengujian stabilitas menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki variasi pembacaan yang relatif kecil dengan tingkat presisi berkisar antara 0% hingga 2,53%. Pengujian pada sampel air biasa, air sumur, dan air sungai menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan karakteristik kualitas air berdasarkan parameter yang diukur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring kualitas air secara real-time serta menghasilkan data pengukuran yang konsisten pada pengukuran berulang. Penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem monitoring kualitas air sanitasi berbasis IoT dengan peningkatan akurasi sensor dan penambahan parameter pengujian pada penelitian selanjutnya.

Kata Kunci: Internet of Things; Kualitas Air Sanitasi; ESP32-C6; Monitoring Real-Time; Sensor Kualitas Air

Abstract—Sanitation water quality is one of the important factors affecting public health. Conventional water quality monitoring generally requires laboratory testing, which is relatively time-consuming, costly, and unable to provide real-time information. This study aims to design and develop an Internet of Things (IoT)-based sanitation water quality monitoring device using an ESP32-C6 microcontroller integrated with pH, total dissolved solids (TDS), turbidity, and temperature sensors. The research method consisted of system design, hardware implementation, sensor accuracy testing, and stability testing through repeated measurements. Accuracy testing was conducted by comparing sensor readings with reference measuring instruments, while stability testing was evaluated using standard deviation and precision (%RSD) values. The results showed that the pH sensor had an error rate of 0.24% and the temperature sensor had an error rate of 2.51%, where as the TDS sensor exhibited an error rate of 16.92%. Stability testing indicated that all sensors produced relatively small measurement variations, with precision values ranging from 0% to 2.53%. Testing on tap water, well water, and river water samples demonstrated that the system was able to distinguish water quality characteristics based on the measured parameters. The results indicate that the developed system is capable of performing real-time water quality monitoring and generating consistent measurement data during repeated observations. This study may serve as a basis for the further development of IoT-based sanitation water quality monitoring systems through improved sensor accuracy and the inclusion of additional water quality parameters in future research.

Keywords: Internet of Things; Sanitation Water Quality; ESP32-C6; Real-Time Monitoring; Water Quality Sensors

1. PENDAHULUAN

Air merupakan kebutuhan dasar manusia yang memiliki peran vital dalam mendukung kehidupan dan kesehatan masyarakat. Kualitas air yang buruk menjadi salah satu penyebab utama berbagai penyakit menular, termasuk diare, kolera, dan infeksi saluran pencernaan lainnya. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menetapkan standar kualitas air minum yang mencakup parameter fisik, kimia, dan biologis sebagai acuan kelayakan konsumsi (Auwal Rabi Dan Sharif et al., 2023). Dalam konteks sanitasi, air yang digunakan untuk keperluan sehari-hari seperti mandi, mencuci, dan memasak harus memenuhi standar kualitas tertentu agar tidak membahayakan kesehatan pengguna. Ketersediaan air bersih yang layak secara sanitasi bukan hanya persoalan teknis, melainkan juga menyangkut dimensi kesehatan masyarakat dan keberlanjutan lingkungan hidup (Sugiharto et al., 2024). Pemantauan kualitas air secara konsisten menjadi prasyarat penting dalam upaya perlindungan ekosistem perairan dan penjaminan keamanan sumber daya air bagi masyarakat (Kumar et al., 2024).

Permasalahan kualitas air semakin kompleks seiring dengan meningkatnya tekanan dari aktivitas industri, pertanian, dan pertumbuhan populasi perkotaan. Pencemaran air dari limbah domestik, limpasan pertanian, dan buangan industri menyebabkan degradasi kualitas sumber air yang signifikan (Islam et al., 2025). Metode pemantauan konvensional yang mengandalkan pengujian sampel di laboratorium dinilai tidak efisien karena membutuhkan waktu yang lama, biaya yang tinggi, serta tidak mampu memberikan informasi secara real-time (Dharmawan et al., 2025; Sharma et al., 2025). Keterbatasan ini mendorong kebutuhan mendesak akan sistem pemantauan kualitas air yang



bersifat kontinu, otomatis, dan dapat diakses dari jarak jauh. Pemantauan berkelanjutan memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan kualitas air sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan sebelum dampak negatif meluas (Öztürk et al., 2025).

Parameter kualitas air yang relevan untuk keperluan sanitasi mencakup pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), turbiditas, dan suhu. Nilai pH mencerminkan tingkat keasaman atau kebasaan air dan menjadi indikator penting dalam menentukan kelayakan air untuk digunakan (Fakhrurroja et al., 2023; Sugiharto et al., 2024). TDS mengukur total padatan terlarut dalam air, termasuk mineral, garam, dan senyawa organik, yang secara langsung berkaitan dengan kemurnian dan keamanan air (Kumar et al., 2024; Sulistiyanto et al., 2023). Turbiditas menggambarkan tingkat kekeruhan air akibat partikel tersuspensi dan berkorelasi dengan risiko kontaminasi mikrobiologis (Auwal Rabi Dansharif et al., 2023; Rayni et al., 2023). Sementara itu, suhu air memengaruhi laju reaksi kimia, pertumbuhan mikroorganisme, serta efektivitas proses desinfeksi (Megantoro et al., 2022; Rao et al., 2021). Keempat parameter ini secara bersama-sama memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi kualitas air sanitasi dan telah diakui sebagai indikator utama dalam berbagai sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) (Sugiharto et al., 2024).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah membuka peluang baru dalam pemantauan kualitas air secara *real-time* dan jarak jauh. IoT memungkinkan perangkat sensor terhubung ke jaringan internet sehingga data dapat dikumpulkan, dikirimkan, dan divisualisasikan secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manusia yang intensif (Auwal Rabi Dansharif et al., 2023; Öztürk et al., 2025). Mikrokontroler ESP32 menjadi salah satu platform yang paling banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT untuk pemantauan kualitas air karena kemampuannya yang mencakup konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth* terintegrasi, kapasitas pemrosesan data yang memadai, serta harga yang terjangkau (Ayon et al., 2026; Sharma et al., 2025). Integrasi sensor-sensor kualitas air dengan ESP32 dan platform *cloud* telah terbukti mampu menghasilkan sistem pemantauan yang efektif dan efisien dalam berbagai konteks aplikasi (Dharmawan et al., 2025; Rao et al., 2021).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi pengembangan sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan berbagai pendekatan dan konteks aplikasi. Dari sisi implementasi sistem *monitoring* berbasis IoT, berbagai penelitian telah berhasil mengembangkan sistem yang mampu memantau parameter kualitas air secara *real-time* menggunakan platform *cloud* seperti *Blynk*, *ThingSpeak*, dan *Node-RED* (Eso et al., 2024; Prompt et al., 2023; Rayni et al., 2023). Penggunaan ESP32 sebagai mikrokontroler utama dalam sistem *monitoring* kualitas air juga telah banyak dilaporkan, dengan kombinasi sensor pH, TDS, turbiditas, dan suhu yang bervariasi sesuai kebutuhan aplikasi (Anggraini et al., 2024; Fakhrurroja et al., 2023; Ramli, 2024; Rasid et al., 2023). Penelitian-penelitian ini secara konsisten menunjukkan bahwa ESP32 mampu mengintegrasikan berbagai sensor secara simultan dan mengirimkan data ke platform *monitoring* dengan latensi yang rendah (Farizi et al., 2024; Rosandi et al., 2023).

Perkembangan penelitian selanjutnya mengarah pada integrasi teknologi *machine learning* untuk meningkatkan kemampuan analisis dan prediksi kualitas air. Berbagai algoritma seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Random Forest*, *Decision Tree*, dan *Multi-Layer Perceptron* telah diterapkan pada sistem *monitoring* berbasis IoT untuk menghasilkan prediksi kualitas air yang lebih akurat (Islam et al., 2025; Nuangpirom et al., 2025; Nuanmeesri & Poomhiran, 2022). Bahkan, beberapa penelitian telah mengimplementasikan TinyML secara langsung pada ESP32 sehingga proses inferensi dapat dilakukan secara lokal tanpa ketergantungan penuh terhadap konektivitas *cloud* (Nuangpirom et al., 2025; Sharma et al., 2025). Selain itu, aspek akurasi dan stabilitas sensor juga mulai mendapat perhatian, ditunjukkan oleh penelitian yang melaporkan akurasi sensor pH mencapai 99,71%, sensor suhu 98,03% (Eso et al., 2024), serta akurasi keseluruhan sistem mencapai 96% (Ayon et al., 2026). Upaya peningkatan kestabilan pembacaan data juga dilakukan melalui penerapan *Kalman Filter* yang mampu menekan *noise* sensor sehingga menghasilkan persentase kesalahan yang relatif rendah, yaitu antara 1% hingga 8,5% (Ramli, 2024).

Meskipun perkembangan tersebut menunjukkan hasil yang menjanjikan, beberapa keterbatasan masih ditemukan pada penelitian sebelumnya. Sebagian besar penelitian yang mengintegrasikan parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu difokuskan pada aplikasi akuakultur, pemantauan sungai, maupun danau sehingga penerapannya pada pemantauan kualitas air sanitasi domestik masih relatif terbatas (Anggraini et al., 2024; Rasid et al., 2023; Rosandi et al., 2023). Selain itu, evaluasi yang dilakukan umumnya hanya berfokus pada akurasi sensor tanpa disertai pengujian stabilitas secara sistematis pada kondisi operasional yang berbeda-beda (Megantoro et al., 2022; Sholihah et al., 2022). Pada penelitian yang mengintegrasikan *machine learning*, perhatian lebih banyak diarahkan pada performa model prediksi dibandingkan kualitas data yang dihasilkan sensor sebagai sumber masukan utama (Islam et al., 2025; Nuanmeesri & Poomhiran, 2022). Di sisi lain, penelitian yang secara khusus mengevaluasi performa sensor umumnya belum mengintegrasikan seluruh parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu dalam satu sistem yang terintegrasi (Ridla et al., 2026; Sulistiyanto et al., 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah berhasil mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT), sebagian besar penelitian masih berfokus pada implementasi sistem dan visualisasi data secara *real-time*. Evaluasi terhadap performa sensor, khususnya akurasi dan stabilitas pengukuran, masih relatif terbatas dan sering kali hanya dilaporkan secara parsial. Selain itu, sebagian besar penelitian diterapkan pada konteks akuakultur, sungai, dan danau sehingga kajian pada air sanitasi domestik masih belum banyak dilakukan. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang tidak hanya mengintegrasikan parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu dalam satu sistem berbasis ESP32, tetapi juga melakukan evaluasi performa sensor secara lebih komprehensif melalui pengujian akurasi terhadap alat referensi dan analisis stabilitas pengukuran.

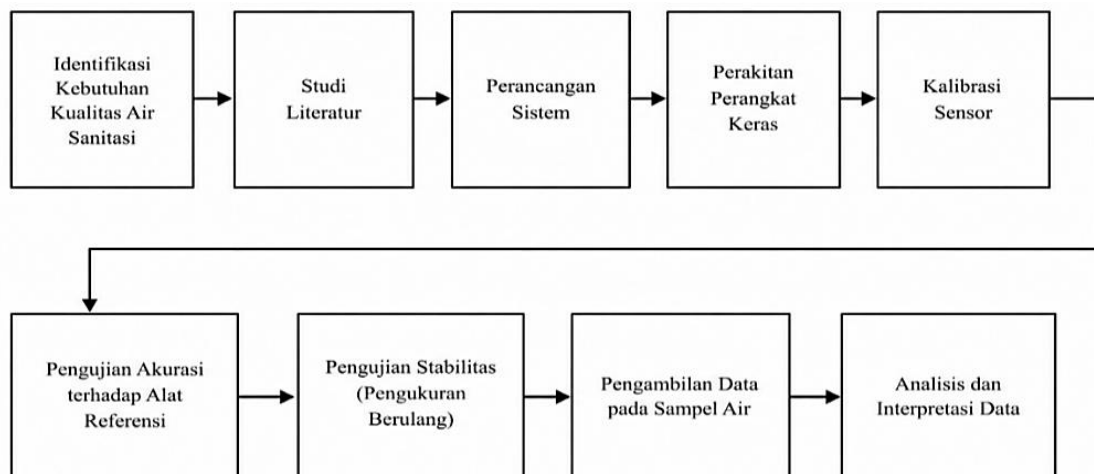
Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring kualitas air sanitasi berbasis ESP32-C6 yang mengintegrasikan parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu dalam satu perangkat serta disertai evaluasi performa sensor melalui pengujian akurasi dan stabilitas pengukuran. Berbeda dengan beberapa penelitian terdahulu yang lebih berfokus pada implementasi sistem monitoring atau visualisasi data, penelitian ini memberikan analisis terhadap tingkat kesalahan dan konsistensi pengukuran sensor sebagai dasar evaluasi kinerja sistem yang dikembangkan.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan alat ukur kualitas air sanitasi berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor pH, TDS, turbiditas, dan suhu. Selain berfokus pada kemampuan *monitoring* secara *real-time*, penelitian ini juga mengevaluasi akurasi dan stabilitas sensor untuk mengetahui tingkat konsistensi hasil pengukuran yang diperoleh. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membangun alat ukur kualitas air sanitasi berbasis IoT yang mampu mengukur parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu secara *real-time* serta mengevaluasi performa sensor yang digunakan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan referensi teknis bagi pengembangan sistem *monitoring* kualitas air sanitasi berbasis IoT serta memperkaya kajian mengenai evaluasi akurasi dan stabilitas sensor pada sistem pemantauan kualitas air.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan rekayasa sistem (*Engineering Design Process*) untuk merancang, membangun, dan mengevaluasi alat ukur kualitas air sanitasi berbasis *Internet of Things* (IoT). Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem, pengujian akurasi sensor, pengujian stabilitas pengukuran, serta analisis data hasil pengukuran.

2.1 Tahapan Penelitian



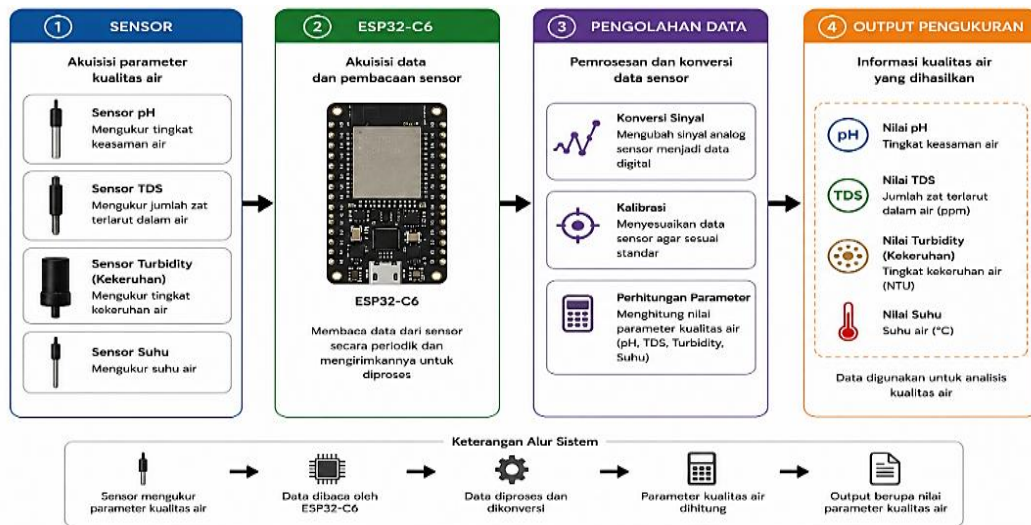
Gambar 1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi kebutuhan sistem *monitoring* kualitas air sanitasi yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi perangkat yang akan dikembangkan. Selanjutnya dilakukan studi literatur mengenai parameter kualitas air, sensor yang digunakan, teknologi *Internet of Things* (IoT), serta metode pengujian yang relevan. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem yang mencakup perancangan perangkat keras dan perangkat lunak kemudian dirakit. Setelah sistem berhasil dibangun, dilakukan kalibrasi sensor untuk memastikan sensor dapat berfungsi dengan baik sebelum digunakan pada proses pengujian. Selanjutnya dilakukan pengujian akurasi dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi. Pengujian stabilitas dilakukan melalui pengukuran berulang untuk mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor. Tahap berikutnya adalah pengambilan data pada beberapa sampel air, yaitu air PDAM, air sumur, dan air sungai. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis dan diinterpretasikan untuk mengevaluasi kinerja sistem *monitoring* kualitas air sanitasi yang telah dikembangkan.

2.2 Perancangan Sistem

Sistem *monitoring* dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32-C6 yang terintegrasi dengan sensor pH, sensor TDS, sensor *turbidity*, dan sensor suhu. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan melalui jaringan internet menuju platform *monitoring* berbasis web untuk ditampilkan secara *real-time*.

2.2.1 Arsitektur Sistem

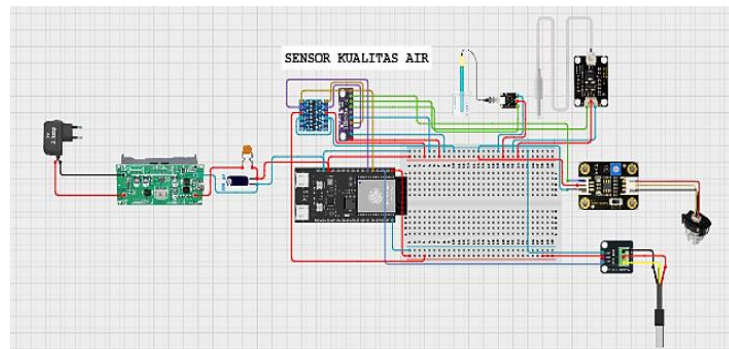


Gambar 2. Arsitektur Sistem Monitoring Kualitas Air

Gambar 2 menjelaskan arsitektur sistem *monitoring* kualitas air yang dirancang untuk mendukung proses pengambilan, pengolahan, dan penyajian data secara terintegrasi. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sensor kualitas air, mikrokontroler, proses pengolahan data, serta media *monitoring*. Sensor digunakan untuk mengukur parameter kualitas air seperti pH, *total dissolved solids* (TDS), kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air.

Data hasil pengukuran dari masing-masing sensor dibaca oleh mikrokontroler ESP32-C6 untuk selanjutnya dilakukan proses pengolahan data. Pada tahap ini, data sensor diproses dan dianalisis untuk menghasilkan nilai parameter kualitas air yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Hasil pengolahan kemudian ditampilkan secara real-time melalui sistem *monitoring* sehingga pengguna dapat memantau kondisi kualitas air secara langsung. Dengan arsitektur tersebut, sistem *monitoring* kualitas air mampu bekerja secara otomatis dan kontinu dalam melakukan pembacaan parameter kualitas air. Selain itu, integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan sistem *monitoring* memungkinkan proses pemantauan kualitas air dilakukan secara lebih efektif, praktis, dan responsif.

2.2.2 Perancangan Sistem



Gambar 3. Skema Rangkaian Sistem Monitoring Kualitas Air

Perancangan perangkat keras pada penelitian ini dilakukan untuk membangun sistem *monitoring* kualitas air yang mampu melakukan proses pengukuran parameter air secara otomatis dan *real-time*. Sistem dirancang menggunakan beberapa sensor kualitas air yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32-C6 sebagai pusat pengolahan data. Sensor yang digunakan meliputi sensor pH untuk mengukur tingkat keasaman air, sensor *total dissolved solids* (TDS) untuk mengukur kadar zat terlarut, sensor *turbidity* untuk mengukur tingkat kekeruhan air, serta sensor suhu untuk mengukur temperatur air. Pada implementasinya, seluruh sensor dihubungkan ke mikrokontroler ESP32-C6 melalui rangkaian sistem *monitoring* kualitas air. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk menghasilkan nilai parameter kualitas air yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan modul pendukung untuk membantu proses pembacaan dan pengolahan data sensor agar pembacaan yang diperoleh lebih stabil dan akurat. Gambar 3 menunjukkan desain rangkaian perangkat keras sistem *monitoring* kualitas air yang digunakan pada penelitian ini. Rangkaian terdiri dari sensor kualitas air, mikrokontroler ESP32-C6, sistem catu daya, serta media *monitoring* output sebagai tampilan hasil pengukuran parameter kualitas air. Dengan rancangan tersebut, sistem *monitoring* kualitas air mampu bekerja secara otomatis dan berkelanjutan dalam melakukan proses pemantauan kualitas air.

2.3 Pengujian Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi pada sampel air yang sama. Tingkat kesalahan dihitung menggunakan persamaan:

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

Nilai *error* yang diperoleh digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi tingkat akurasi masing-masing sensor dalam sistem *monitoring* kualitas air sanitasi yang dikembangkan.

2.4 Pengujian Stabilitas Sensor

Pengujian stabilitas dilakukan melalui pengukuran berulang sebanyak *n* kali pada sampel yang sama. Parameter yang dianalisis meliputi rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi untuk mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor.

2.5 Pengambilan dan Analisis Data

Pengambilan data dilakukan pada tiga jenis sampel air, yaitu air PDAM, air sumur, dan air sungai. Data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif dan dibandingkan dengan baku mutu kualitas air yang berlaku sesuai regulasi nasional.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil implementasi dan pengujian sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT). Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam mengukur parameter kualitas air serta kemampuan sistem dalam mengirimkan data secara *real-time*. Selain itu, dilakukan pembahasan terhadap hasil pengujian yang diperoleh untuk mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan berdasarkan aspek akurasi, stabilitas, dan kemampuan *monitoring* yang telah dirancang.

3.1 Implementasi Perangkat



Gambar 4. Implementasi Perangkat Monitoring Kualitas Air

Gambar 4 menunjukkan implementasi perangkat *monitoring* kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem terdiri dari sensor pH, sensor *total dissolved solids* (TDS), sensor kekeruhan (*turbidity*), dan sensor suhu yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32-C6 DevKitC-1 yang ditempatkan pada box kontrol sebagai pusat pengolahan data sistem. Pada implementasinya, sensor kekeruhan (*turbidity*) ditempatkan pada bagian tengah perangkat, sensor pH berada pada sisi kiri, sedangkan sensor TDS dan sensor suhu ditempatkan pada sisi kanan perangkat. Penempatan sensor tersebut dirancang untuk mempermudah proses pengukuran serta menjaga kestabilan pembacaan data dari masing-masing sensor.

3.2 Analisis Akurasi

Analisis akurasi dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian sistem *monitoring* kualitas air yang telah dikembangkan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan alat *monitoring* terhadap alat ukur standar komersial pada sampel air PDAM. Parameter yang diuji meliputi pH, *total dissolved solids* (TDS), kekeruhan (*turbidity*), dan suhu air. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam menghasilkan data yang mendekati nilai referensi.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Pembacaan Alat Monitoring dan Alat Standar

Parameter	Nilai Sensor (Alat Buatan)	Nilai Refrensi Alat	Error (%)
pH	8.26	8.24	0.24
Suhu	28.6	27.9	2.51
Turbidity	2	0	-
TDS	76	65	16.92



Berdasarkan hasil pengujian, sensor pH menunjukkan tingkat kesalahan sebesar 0,24%, sedangkan sensor suhu memiliki tingkat kesalahan sebesar 2,51%. Nilai *error* yang rendah pada kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan hasil pengukuran yang mendekati alat referensi. Pada parameter *turbidity*, alat *monitoring* mendeteksi nilai kekeruhan sebesar 2 NTU, sedangkan alat referensi menunjukkan nilai 0 NTU sehingga perhitungan *error* relatif tidak dapat dilakukan karena nilai referensi bernilai nol.

Pada parameter TDS diperoleh nilai pembacaan sensor sebesar 76 ppm dan nilai referensi sebesar 65 ppm dengan tingkat kesalahan sebesar 16,92%. Nilai kesalahan tersebut menunjukkan bahwa akurasi sensor TDS masih lebih rendah dibandingkan sensor pH dan suhu. Perbedaan hasil pengukuran diduga dipengaruhi oleh fenomena polarisasi elektroda (*electrode polarization*) pada probe TDS yang dapat memengaruhi respons sensor selama proses pengukuran. Selain itu, variasi kandungan ion terlarut pada sampel air juga dapat menyebabkan perbedaan pembacaan antara sensor dan alat referensi. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi dan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi pengukuran sensor TDS.

Secara keseluruhan, sistem *monitoring* kualitas air menunjukkan kinerja yang baik pada pengukuran parameter pH dan suhu. Namun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor TDS masih memerlukan peningkatan akurasi, sedangkan sensor *turbidity* memerlukan evaluasi lebih lanjut untuk memastikan kesesuaian hasil pengukuran dengan alat referensi. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan telah mampu melakukan pemantauan kualitas air secara *real-time* dan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem *monitoring* kualitas air sanitasi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang lebih andal.

3.3 Analisis Stabilitas Sensor

Analisis stabilitas sensor dilakukan melalui pengukuran berulang pada sampel yang sama untuk mengevaluasi konsistensi hasil pembacaan sensor. Pengujian dilakukan pada tiga jenis sampel air, yaitu air PDAM, air sumur, dan air sungai. Setiap sampel diukur beberapa kali untuk memperoleh gambaran variasi hasil pembacaan sensor pH, TDS, *turbidity*, dan suhu.

Tabel 2. Nilai rata-rata hasil pengukuran pada masing-masing sampel air

Kondisi Air	Parameter	Rata-Rata	Standar deviasi	Tingkat Presisi
Air PDAM	ph	6.90	0,02	0,29
	TDS	99,42	0,58	0,58
	suhu	31.9	0	0
	turbidity	0	0	0
Air sumur	ph	7.6	0,04	0,53
	TDS	120,8	1,41	1,17
	suhu	29,46	0,09	0,31
	turbidity	2	0,07	3,54
Air Sungai	pH	5.46	0,07	1,28
	TDS	145,24	3,67	2,53
	suhu	28.78	0,23	0,8
	turbidity	6	0,07	1,18

Berdasarkan hasil pengukuran berulang pada Tabel 2, variasi nilai yang diperoleh pada setiap parameter relatif kecil. Pada sampel air PDAM, nilai pH memiliki rata-rata 6,90 dengan standar deviasi 0,02 dan tingkat presisi 0,29%, sedangkan nilai TDS memiliki rata-rata 99,42 ppm dengan standar deviasi 0,58 dan tingkat presisi 0,58%. Parameter suhu menunjukkan hasil yang sangat stabil dengan nilai rata-rata 31,9°C dan tidak menunjukkan variasi pengukuran. Parameter kekeruhan (*turbidity*) memiliki nilai rata-rata 0 NTU dan menunjukkan hasil yang konsisten pada seluruh pengukuran.

Pada sampel air sumur, nilai pH memiliki rata-rata 7,60 dengan tingkat presisi 0,53%, sedangkan TDS memiliki rata-rata 120,80 ppm dengan tingkat presisi 1,17%. Suhu menunjukkan rata-rata 29,46°C dengan tingkat presisi 0,31%. Parameter *turbidity* memiliki nilai rata-rata 2 NTU dengan variasi pengukuran yang relatif kecil. Nilai presisi yang rendah pada seluruh parameter menunjukkan bahwa hasil pengukuran yang diperoleh relatif konsisten antar pengulangan.

Pada sampel air sungai, nilai pH memiliki rata-rata 5,46 dengan tingkat presisi 1,28%, sedangkan TDS memiliki rata-rata 145,24 ppm dengan tingkat presisi 2,53%. Suhu memiliki rata-rata 28,78°C dengan tingkat presisi 0,80%. Parameter *turbidity* memiliki nilai rata-rata 6 NTU yang menunjukkan tingkat kekeruhan lebih tinggi dibandingkan sampel air biasa dan air sumur. Meskipun nilai presisi TDS pada air sungai merupakan yang tertinggi dibandingkan parameter lainnya, nilainya masih tergolong rendah sehingga menunjukkan konsistensi pengukuran yang baik.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran berulang menunjukkan bahwa sistem *monitoring* kualitas air memiliki tingkat kestabilan dan presisi yang baik. Nilai standar deviasi dan tingkat presisi yang relatif rendah pada seluruh parameter mengindikasikan bahwa sensor mampu menghasilkan data yang konsisten ketika digunakan untuk mengukur sampel yang sama secara berulang. Selain itu, sensor *turbidity* mampu membedakan tingkat kekeruhan pada masing-masing sampel air yang diuji. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat digunakan untuk mendukung proses pemantauan kualitas air secara berkelanjutan.



3.4 Analisis Hasil Pengujian pada Sampel Air Sanitasi

Pengujian dilakukan pada tiga jenis sampel air sanitasi, yaitu air biasa, air sumur, dan air sungai. Pengukuran dilakukan menggunakan sistem *monitoring* kualitas air yang telah dikembangkan untuk mengetahui karakteristik masing-masing sampel berdasarkan parameter pH, *total dissolved solids* (TDS), turbidity, dan suhu. Nilai yang digunakan merupakan rata-rata hasil pengukuran dari beberapa kali pengambilan data pada setiap sampel.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Rata-rata Kualitas Air Sanitasi

Sampel	pH	TDS (ppm)	Turbidity (NTU)	Suhu (°C)	Status
Air Biasa	6.92	99.45	0	31.90	Memenuhi Parameter yang Diuji
Air Sumur	7.56	120.80	2	29.46	Memenuhi Parameter yang Diuji
Air Sungai	6.87	145.24	6	28.78	Memenuhi Parameter yang Diuji

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 3, terdapat perbedaan karakteristik kualitas air pada masing-masing sampel. Air sumur memiliki nilai pH tertinggi sebesar 7,56, sedangkan air sungai memiliki nilai pH terendah sebesar 6,87. Meskipun demikian, seluruh sampel masih berada pada rentang pH yang diperbolehkan untuk air sanitasi sehingga menunjukkan kondisi keasaman yang masih sesuai dengan baku mutu yang berlaku.

Pada parameter *total dissolved solids* (TDS), air sungai menunjukkan nilai tertinggi sebesar 145,24 ppm, diikuti air sumur sebesar 120,80 ppm, dan air biasa sebesar 99,45 ppm. Tingginya nilai TDS pada air sungai menunjukkan bahwa sampel tersebut mengandung zat terlarut lebih banyak dibandingkan sampel lainnya. Kandungan zat terlarut tersebut dapat berasal dari mineral, material organik, maupun partikel yang terbawa aliran air. Hasil pengukuran *turbidity* menunjukkan adanya perbedaan tingkat kekeruhan antar sampel. Air sungai memiliki nilai *turbidity* lebih tinggi dibandingkan air biasa dan air sumur, yang menunjukkan adanya partikel tersuspensi lebih banyak pada sampel tersebut. Sementara itu, parameter suhu menunjukkan rentang nilai antara 28,78°C hingga 31,90°C. Perbedaan suhu yang diperoleh relatif kecil dan masih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan saat pengambilan sampel.

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, parameter pH air sanitasi yang diperbolehkan berada pada rentang 6,5–8,5. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh sampel memenuhi kriteria tersebut. Selain itu, nilai TDS yang diperoleh juga masih berada di bawah batas maksimum yang dipersyaratkan. Berdasarkan parameter pH, TDS, *turbidity*, dan suhu yang diukur pada penelitian ini, seluruh sampel masih berada dalam rentang baku mutu yang berlaku. Namun demikian, penentuan kualitas air sanitasi secara menyeluruh memerlukan pengujian parameter lain, seperti parameter mikrobiologi, logam berat, dan parameter kimia lainnya sesuai standar yang berlaku.

3.5 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Untuk mengevaluasi kinerja sistem yang dikembangkan, hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu yang memiliki kesamaan pada parameter pengukuran kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT). Perbandingan dilakukan terhadap parameter pH, suhu, TDS, dan stabilitas pengukuran untuk mengetahui posisi performa sistem yang dikembangkan dibandingkan penelitian sebelumnya. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Parameter	Penelitian Ini	Penelitian Terdahulu	Keterangan
pH	Error 0,24%	Eso et al. (2024): akurasi 99,71%	Performa pH relatif sebanding
Suhu	Error 2,51%	Eso et al. (2024): akurasi 98,03%	Sedikit lebih rendah
TDS	Error 16,92%	Ramli (2024): error 1–8,5%	Masih lebih tinggi
Stabilitas	0–2,53% RSD	-	Menunjukkan hasil pengukuran konsisten
Turbiditas	Dapat membedakan sampel air	Tidak dibandingkan	Belum diuji dengan alat referensi

Berdasarkan Tabel 4, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sensor pH memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,24%, yang menunjukkan performa pengukuran yang baik dan mendekati hasil penelitian Eso et al. (2024) yang melaporkan akurasi sensor pH sebesar 99,71%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa sensor pH yang digunakan mampu menghasilkan data yang relatif mendekati nilai referensi sehingga layak digunakan untuk pemantauan kualitas air sanitasi.

Pada parameter suhu, penelitian ini menghasilkan tingkat kesalahan sebesar 2,51%, sedangkan Eso et al. (2024) melaporkan akurasi sebesar 98,03%. Perbedaan hasil tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik sensor yang digunakan, kondisi lingkungan saat pengujian, serta metode kalibrasi yang diterapkan pada masing-masing penelitian. Meskipun demikian, nilai kesalahan yang diperoleh masih menunjukkan bahwa sensor suhu mampu memberikan hasil pengukuran yang cukup baik.



Pada parameter TDS, tingkat kesalahan yang diperoleh sebesar 16,92%, lebih tinggi dibandingkan penelitian Ramli (2024) yang melaporkan tingkat kesalahan sebesar 1% hingga 8,5% setelah penerapan Kalman Filter. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa akurasi sensor TDS pada penelitian ini masih perlu ditingkatkan. Faktor yang memengaruhi tingginya nilai kesalahan antara lain karakteristik sensor TDS, proses kalibrasi, serta kemungkinan terjadinya fenomena polarisasi elektroda yang dapat memengaruhi hasil pembacaan.

Dari sisi stabilitas pengukuran, penelitian ini menunjukkan nilai presisi (%RSD) sebesar 0% hingga 2,53%, yang mengindikasikan bahwa sistem mampu menghasilkan data yang relatif konsisten pada pengukuran berulang. Pada parameter turbiditas, sistem mampu membedakan tingkat kekeruhan antar sampel air yang diuji. Namun demikian, penelitian ini belum melakukan perbandingan hasil pengukuran turbiditas dengan alat ukur turbidimeter referensi sehingga tingkat akurasi sensor turbiditas belum dapat dievaluasi secara kuantitatif. Oleh karena itu, pengujian menggunakan alat referensi diperlukan pada penelitian selanjutnya untuk memperoleh informasi akurasi sensor turbiditas yang lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring kualitas air sanitasi berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32-C6 yang terintegrasi dengan sensor pH, *total dissolved solids* (TDS), turbiditas, dan suhu. Sistem mampu melakukan pengukuran parameter kualitas air secara otomatis serta menampilkan hasil pengukuran secara *real-time*. Hasil pengujian akurasi menunjukkan bahwa sensor pH memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,24% dan sensor suhu sebesar 2,51%, sedangkan sensor TDS memiliki tingkat kesalahan sebesar 16,92% terhadap alat referensi. Pada parameter turbiditas, sensor mampu membedakan tingkat kekeruhan antar sampel air yang diuji, namun akurasinya belum dapat dievaluasi secara kuantitatif karena belum dilakukan perbandingan dengan alat ukur turbidimeter referensi. Hasil pengujian stabilitas menunjukkan nilai presisi (%RSD) berkisar antara 0% hingga 2,53%, yang mengindikasikan bahwa sistem mampu menghasilkan data yang relatif konsisten pada pengukuran berulang. Pengujian pada sampel air PDAM, air sumur, dan air sungai menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan karakteristik kualitas air berdasarkan parameter yang diukur. Secara keseluruhan, tujuan penelitian telah tercapai, yaitu menghasilkan alat ukur kualitas air sanitasi berbasis IoT yang mampu melakukan monitoring parameter pH, TDS, turbiditas, dan suhu secara *real-time*. Meskipun demikian, peningkatan akurasi sensor TDS serta validasi sensor turbiditas menggunakan alat referensi masih diperlukan untuk meningkatkan kinerja sistem pada penelitian selanjutnya.

REFERENCES

- Anggraini, E. A., Putra, G. B., & Kurniawan, R. (2024). Design of a Nodemcu-Based System for Monitoring and Controlling the Water Quality of Catfish Tarp Pond. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1419(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1419/1/012040>
- Ayon, M. D. F. I., Nahar, S., Rahman, A., Arif, Md. T., Hasib, A., & Akib, A. S. M. A. S. (2026). *An IoT-Enabled Smart Aquarium System for Real-Time Water Quality Monitoring and Automated Feeding*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2601.08484>
- Auwal Rabiul Dansharif, Zainab Abdulkadir, Suleiman Bashir Abubakar, Amina Ibrahim, Ibrahim Umar, & Muhammad Ahmad Baballe. (2023). Benefits of Water Quality Monitoring. *Journal of Mathematical Techniques and Computational Mathematics*, 2(5), 175–179. <https://doi.org/10.33140/jmtcm.02.05.01>
- Dharmawan, N. A., Nugroho, P., & Wibowo, S. B. (2025). *Development of IoT Devices for Drinking Water Quality Monitoring Systems*. 27, 238–245. <https://doi.org/10.4028/p-n8hm2k>
- Eso, R., Mokui, H. T., Arman, A., Safiuddin, L., & Husen, H. (2024). Water Quality Monitoring System Based on the Internet of Things (IoT) for Vanname Shrimp Farming. *Comtech Computer Mathematics and Engineering Applications*, 15(1), 53–63. <https://doi.org/10.21512/comtech.v15i1.10657>
- Fakhrurroja, H., Nuryatno, E. T., Munandar, A., Fahmi, M. R., & Mahardiono, N. A. (2023). Water Quality Assessment Monitoring System Using Fuzzy Logic and the Internet of Things. *Mechatronics Electrical Power and Vehicular Technology*, 14(2), 198–207. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2023.v14.198-207>
- Farizi, S. D. A. L., Darlis, D., & Hartaman, A. (2024). Lake Water Quality Measurement System at Situ Tekno Using an ESP32-based Autonomous Surface Vehicle. *Elkomika Jurnal Teknik Energi Elektrik Teknik Telekomunikasi & Teknik Elektronika*, 12(1), 121. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v12i1.121>
- Islam, Md. A., Roy, S. C., Utsho, Md. F. U., Naznin, L., Sarkar, R., & Sarkar, R. R. (2025). *An IoT-Enabled Intelligent Water Quality Monitoring System for Tourist Safety Using Machine Learning*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5488426/v1>
- Kumar, J., Gupta, R., Sharma, S., Chakrabarti, T., Chakrabarti, P., & Margala, M. (2024). IoT-Enabled Advanced Water Quality Monitoring System for Pond Management and Environmental Conservation. *Ieee Access*, 12, 58156–58167. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3391807>
- Megantoro, P., Prastio, R. P., Kusuma, H. F. A., Abror, A., Vigneshwaran, P., Priambodo, D. F., & Alif, D. S. (2022). Instrumentation System for Data Acquisition and Monitoring of Hydroponic Farming Using ESP32 via Google



- Firestore. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(1), 52. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i1.pp52-61>
- Nuangpirom, P., Pitjamit, S., Jaikampan, V., Peerakam, C., Nakkiew, W., & Jewpanya, P. (2025). Machine Learning on Low-Cost Edge Devices for Real-Time Water Quality Prediction in Tilapia Aquaculture. *Sensors*, 25(19), 6159. <https://doi.org/10.3390/s25196159>
- Nuanmeesri, S., & Poomhiran, L. (2022). Multi-Layer Perceptron Neural Network and Internet of Things for Improving the Realtime Aquatic Ecosystem Quality Monitoring and Analysis. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (Ijim)*, 16(06), 21–40. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i06.28661>
- Öztürk, M., Ünsal, E., & Yelkuvan, A. F. (2025). Development of an Internet of Things-Based Ultra-Pure Water Quality Monitoring System. *Sensors*, 25(4), 1186. <https://doi.org/10.3390/s25041186>
- Prompt, S., Maithomklang, S., & Panya-Isara, C. (2023). Design and Analysis Performance of IoT-Based Water Quality Monitoring System Using LoRa Technology. *Tem Journal*, 29–35. <https://doi.org/10.18421/tem121-04>
- Ramli, M. H. M. (2024). Kalman Filter-Based Data Stabilization for an Automated Water Quality Monitoring System in Macrobrachium Rosenbergii Larvae Culture. *Journal of Mechanical Engineering*, 13, 157–176. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v13i1.2862>
- Rao, T. S., Pranay, P., Narayana, S., Reddy, Y. S. S., & Kaur, P. (2021). ESP32 Based Implementation of Water Quality and Quantity Regulating System. 4. <https://doi.org/10.2991/ahis.k.210913.016>
- Rasid, R. A., Hariyanto, N. S., Faizal, N. A. M., & Mazlan, N. N. (2023). Smart Home Aquaponic System Monitoring and Control With Internet of Things Using Mobile Application. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 9(1), 20–25. <https://doi.org/10.15282/jceb.v9i1.8723>
- Rayni, A., Pardede, A. M. H., & Khair, H. (2023). Design and Development of a Quality and Quantity Water Monitoring System for Water Tank Based on Internet of Things. *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (Jaiea)*, 3(1), 328–334. <https://doi.org/10.59934/jaiea.v3i1.319>
- Ridla, M. R., Ali, H., Mufti, N., Saparullah, S., Abadi, M. T. H., Fadhlullah, N. F., Yuliana, E. S., Muladi, M., & Laksono, Y. A. (2026). Water Quality Monitoring Device: IoT-based System for Aquaculture Applications. *Engineering Innovations*, 16, 97–105. <https://doi.org/10.4028/p-5114yq>
- Rosandi, D., Junaidi, J., Apriyanto, D. K., & Surtono, A. (2023). Design of Water Quality Monitoring System for Koi Fish Farming Using NodeMCU ESP32 and Blynk Application Based on Internet of Things. *Jurnal Listrik Instrumentasi Dan Elektronika Terapan*, 4(1). <https://doi.org/10.22146/juliet.v4i1.83131>
- Sharma, S., Mishra, D., Yadav, A., Gami, B., & Madhan, E. S. (2025). A Low-Cost Intelligent Water Quality Monitoring System With on-Device Machine Learning and Cloud Integration. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7787812/v1>
- Sholihah, W., Hendriana, A., Kusumanti, I., & Novianty, I. (2022). Design of IoT Based Water Monitoring System (Simonair) for Arwana Fish Cultivation. *Eduvest - Journal of Universal Studies*, 2(12), 2872–2884. <https://doi.org/10.36418/eduvest.v2i12.708>
- Sugiharto, W. H., Susanto, H., & Prasetyo, A. B. (2024). Selecting IoT-Enabled Water Quality Index Parameters for Smart Environmental Management. *Instrumentation Measure Métrologie*, 23(4). <https://doi.org/10.18280/i2m.230401>
- Sulistiyo, S., Setyobudi, R., & Tijaniyah. (2023). Utilization of TDS Sensors for Water Quality Monitoring and Water Filtering of Carp Pools Using IoT. *Eureka Physics and Engineering*, (6), 69–77. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002865>