Perancangan dan Implementasi Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Dashboard Web

Yusuf Affandi[(1,a)*], Giena Houri Qissisina [(2,b)], Yus Yusuf Hidayat [(2,c)], Rizki Yustisia Sari[(1,d)], dan Ferial Asferizal[(3,e)]

[(1)]*Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia, 35365*

[(2)] *Program Sarjana Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia, 35365*

[(3)]*Rekayasa Tata Kelola Air Terpadu, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia, 35365*

Email : [(a)]yusuf.affandi@ia.itera.ac.id, [(b)] giena.123490003@student.itera.ac.id , [(c)]yus.123490038@student.itera.ac.id , [(d)]rizki.sari@ia.itera.ac.id, [(e)]ferial.asferizal@tka.itera.ac.id*

Diterima (15 Desember 2025), Direvisi (15 April 2026)

Abstract. *Access to clean and safe water is a fundamental and essential necessity to support daily human activities. Meanwhile, rapid population growth demands an efficient water quality monitoring system. This study aims to develop, test, and evaluate a water quality monitoring system based on the ESP32 microcontroller integreted with IoT. The prototype system is designed to measure physical and chemical parameters contained in water, including pH, TDS (Total Dissolved Solids), and Turbidity. The measurement data are displayed on an LCD and also transmitted in real time to a Firebase database, then visualized on a website. The measurement results show good accuracy, indicated by the MAPE, MAE and RMSE values, which remain within acceptable limits. The developed monitoring website also presents trend graphs of water quality, as well as an on/off relay control feature to regulate sensor data transmission for better energy efficiency. These results provide an innovative and effective solution for real-time and remote water quality monitoring in support of high-quality water provision.*

Keywords: *ESP32, IoT, pH, TDS, Turbidity*

Abstrak. Akses terhadap air yang bersih dan aman merupakan kebutuhan utama dan mendasar, dalam mendukung aktifitas manusia sehari-hari. Sementara itu pertumbuhan populasi yang pesat, menuntut adanya sistem pemantauan kualitas air yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan, menguji dan mengevaluasi sistem monitoring kualitas air berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan IoT. Prototipe sistem dirancang untuk mengukur parameter fisik dan kimia yang terkadung dalam air, meliputi pH, TDS (*Total Disolved Solids*), dan *Turbidity.* Data hasil pengukuran ditampilkan pada LCD dan juga dikirimkan secara *real-time* ke basis data Firebase, kemudian ditampilkan pada website. Hasil pengukuran menunjukkan nilai akurasi yang baik yang ditunjukkan dengan nilai MAPE, MAE, dan RMSE yang masih berada dalam batas yang dapat diterima. Website monitoring yang dikembangkan juga menampilkan grafik tren kualitas air, serta fitur kontrol on/off relay untuk mengatur pengiriman data sensor agar lebih hemat energi. Hasil ini memberikan solusi inovatif dan efektif dalam pemantauan kualitas air secara *real-time* dan jarak jauh dalam mendukung penyediaan air yang berkualitas.

Kata kunci: ESP32, IoT, pH, TDS, *Turbidity*.

PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya alam yang paling penting dalam kehidupan manusia, membentuk sekitar 60% dari tubuh manusia, serta vital dalam menjaga kesejahteraan ekosistem hidup lainnya. Manusia membutuhkan air untuk kegiatan sehari-hari seperti mencuci, mandi, irigasi, akuakultur, minum dan beragai keperluan lainnya. Akses terhadap air bersih dan aman sangat penting bagi kesehatan dan keberlanjutan lingkungan, serta menjadi salah satu indikator utama dalam pemcapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs)[1].

Ketersedian air yang sehat dan bersih menjadi tantangan saat ini. Perilaku manusia baik secara individu maupun institusi mempengaruhi ketersedian air bersih dan sehat. Limbah rumah tangga serta limbah pabrik menjadi beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sumber air bersih. Pemantauan kualitas air dapat menjadi suatu langkah pengawasan atau pengendalian terhadap adanya kandungan pencemar pada air. Sehingga timbulnya beberapa penyakit akibat air tercemar dapat dihindari.

Berbagai penelitian dan pengembangan sistem monitoring kualitas air telah banyak dilakukan hingga saat ini. Parameter-parameter kualitas air seperti pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), suhu, konduktivitas listrik, dan *dissolved oxigen* (DO), telah digunakan dalam sistem yang dikembangkan [2]-[6]. Hal ini menunjukkan pentingnya variasi parameter yang dipilih sesuai dengan kebutuhan aplikasi, misalnya untuk air minum, pengelolaan limbah, maupun bidang akuakultur [7][8][9].

Penelitian sebelumnya telah mengintegrasikan berbagai sensor yang berbeda dengan mikrokontroler seperti Arduino Uno[2][4], ESP8266[3], dan mikrokontroler Atmega [10][11] untuk mengukur parameter-parameter kualitas air. Bermacam platform IoT, seperti Blynk [2] [3], ThingSpeak[12], dan MQTT [13], juga sudah dikembangkan untuk data transmisi dan visualisasi data, sementara teknologi komunikasi jarah jauh berdaya rendah seperti LoRa [14] juga dikembangkan untuk sistem pemantauan dengan cakupan area yang luas. Meskipun demikian, sistem monitoring kualitas air yang efektif, dan hemat energi serta *user interface* yang interaktif, masih menjadi tantangan dalam pengembangan sistem ini.

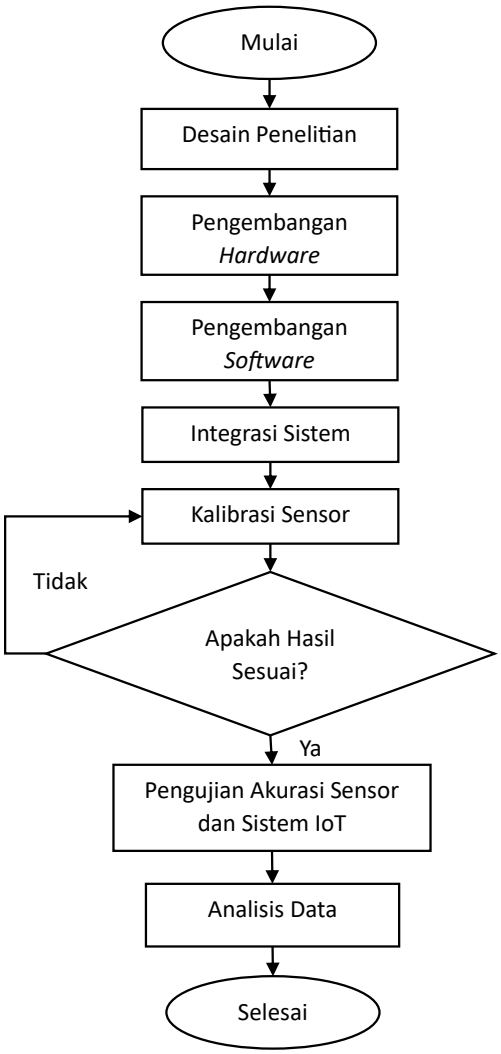
Meskipun beberapa sistem monitoring kualitas air telah dikembangkan, namun masih terdapat beberapa keterbatasan pada penelitian sebelumnya. Sebagian besar sistem masih bergantung pada platform pihak ketiga untuk visualisasi data, sehingga fleksibilitas dalam pengembangan antarmuka pengguna menjadi terbatas. Selain itu, integrasi sistem secara menyeluruh dari akuisisi data, pengiriman, hingga visualisasi yang terpusat masih belum banyak diimplementasikan. Mekanisme kontrol perangkat secara langsung melalui sistem monitoring juga masih jarang ditemukan, sehingga belum dapat mengontrol pengendalian daya sistem. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem monitoring kualitas air yang tidak hanya mampu melakukan pemantauan secara *real-time,* namun juga menyediakan fleksibilitas dalam pengelolaan sistem serta interaksi pengguna yang lebih aktif.

Dalam menjawab tantangan tersebut, penelitian ini, mengkaji dan mengembangkan sebuah sistem monitoring kualitas air berbasis IoT menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan Firebase sebagai database dan sebuah dashboard berbasis website untuk menampilkan data secara *real-time*. Pada sistem yang dikembangkan, tiga parameter kualitas air yang diukur yaitu, pH, TDS, dan *turbidity.* Komponen elektronika relay juga dirangkai dalam sistem sebagai kontrol mekanis yang digunakan untuk menghidupkan dan mematikan sensor melalui *user interface,* untuk mengoptimalkan konsumsi energi.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan monitoring kualitas air, yang mengkombinasikan multi-parameter sensor, akuisisi data berbasis IoT dan *user interface* yang interaktif. Pengembangan sistem ini dapat mendukung aplikasi manajemen air di domestik, akuakultur dan isu lingkungan.

METODE PENELITIAN

Alur penelitian pada studi ini meliputi tahapan desain penelitian, pengembangan *hardware* dan *software*, integrasi sistem, tahap kalibrasi, serta tahap pengujian sistem dan analisis seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



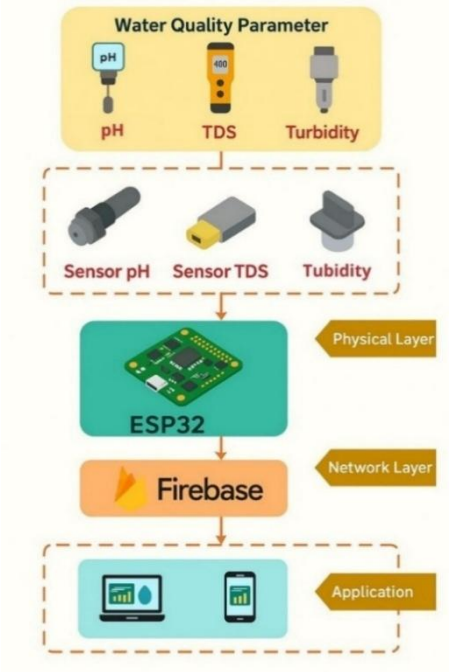
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development (R&D) Engineering Design* dan Eksperimental yang berfokus pada proses perancangan, pengembangan, dan evaluasi performa sistem monitoring kualitas air berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan website.

Arsitektur sistem dari prototipe monitoring kualitas air yang dirancang ditunjukkan pada **Gambar 2**, yang terdiri dari tiga lapisan utama sesuai dengan konstruksi umum pada sistem IoT, yaitu *physical layer*, *network layer,* dan *application layer.*

Pada *physical layer,* sistem mengintegrasikan tiga sensor kualitas air, yaitu sensor pH, TDS, dan *turbidity*. Sensor-sensor ini mendeteksi parameter fisika dan kimia air untuk menghasilkan sinyal analog yang merepresentasikan nilai pengukuran. Mikrokontroler ESP32 juga termasuk dalam lapisan ini, dimana seluruh sinyal analog dari sensor diakuisisi melalui port ADC untuk kemudian diproses lebih lanjut.



Gambar 2. Arsitektur Sistem

Tabel. 1 Komponen Hardware, Spesifikasi dan Fungsi

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
ESP32-WROOM	Mikrokontroler duar-core 240 MHz dengan memori flash 4 MB, dilengkapi ADC 12-bit, modul WiFi 802,11 b/g/n, Bluethooth, dan Tegangan Operasi pada 3.3V untuk GPIO, dengan daya bisa disuplai melalui USB 5V	Sebagai pengendali utama yang membaca data sensor, memproses sinyal analog, mengirimkan data ke Firebase, serta menerima perintah kontrol dari dashboard website
Sensor pH dengan modul sinyal	Modul PH-4502C dengan probe pH BNC, bekerja pada tegangan 3,3-5 V, rentang pengukuran pH 0-14, dilengkapi pengkondisi sinyal dan potensiometer	Mengukur nilai pH zat cair menggunakan probe elekektroda dan menghasilkan sinyal analog
Sensor TDS dengan Modul Penguat	Sensor TDS dengann probe stainless steel, rentang pengukuran hingga 1000 ppm, *output* analog 0-2,3 V melalui modul penguat, dan bekerja pada tegangan 5 V	Mengukur kadar *Total dissolved Solids* berdasarkan konduktivitas air
Sensor *Turbidity* modul IR	Sensor *turbidity* berbasis LED inframerah dan photodiode, bekerja pada tegangan 5 V, output analog 0-4,5 V, rentang deteksi kekeruhan 0-1000 NTU	Mendeteksi tingkat kekeruhan air dengan mengukur intensitas cahaya yang tersebar oleh partikel dalam air
Modul Relay	Modul relay 5 V dengann empat kanal, kapasitas beban hingga 10 A 250 VAC dilengkapi isolasi optocoupler dan kompatibel dengan sinyal kendali ESP32	Sebagai saklar elektronik dari jarak jauh sebagai bagian dari mekanisme penghematan energi
Regulator LM2596	Modul step-down berbasis LM2596, input 4-40V, output dapat diatur 1,25-37V, arus maksimum hingga 3 A	Menurunkan dan menstabilkan tegangan *input* yang lebih tinggi menjadi tegangan *output* yang sesuai dan aman untuk mensuplai mikrokontroler dalam sistem

Pada *network layer,* ESP32 terhubung ke jaringan IoT melalui modul WiFi internal dan berkomunnikasi dengan Firebase *real-time* Database sebagai platform penyimpanan data berbasis *cloud*. Data sensor yang telah diproses dikirimkan oleh ESP32 ke Firebase dalam format terstruktur sehingga dapat disinkronkan secara *real-time*. Pada *application layer*, sistem menyediakan antarmuka komunikasi bagi pengguna. *Dashboard* berbasis website menampilkan nilai sensor, grafik tren, serta status sensor, dan juga menyediakan fitur kontrol relay jarak jauh yang memungkinkan pengelolaan mode hemat energi pada ESP32. Melalui arsitektur tiga

lapis ini, sistem yang diusulkan mampu menyediakan solusi pemantauan kualitas air yang *real time*, mudah diakses, dan mempertimbangkan efisiensi energi.

Pengembangan Hardware

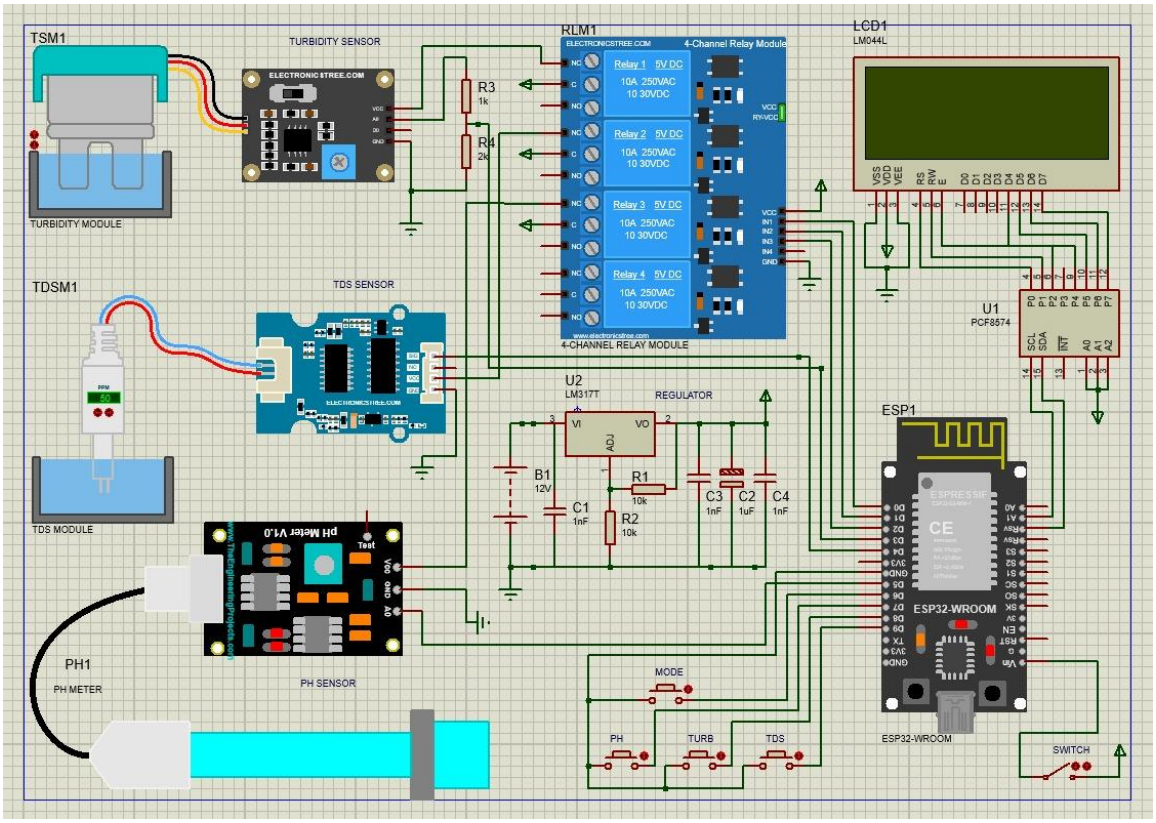
Subsistem *hardware* dirancang untuk mendukung pengambilan data parameter kualitas air secara *real time* dan konsumsi energi yang efisien. Sistem mengintegrasikan Mikrokontroler ESP32 dengan sensor pH, TDS dan *Turbidity* melalui antarmuka analog. Spesifikasi komponen *hardware* yang digunakan dalam sistem ini ditampilkan pada **Tabel 1**.

Diagram skematik pada **Gambar 3** menggambarkan integrasi antar komponen pada sistem monitoring kualitas air. Sensor pH, TDS, dan *turbidity* masing-masing dihubungkan ke *input* ADC ESP32. Modul relay empat kanal digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengaktifkan atau menonaktifkan sensor. ESP32 mengontrol relay berdasarkan perintah dari website dashboard, sehingga sistem dapat beroperasi dalam mode hemat energi.

Regulator LM2596 mengatur suplai daya 12 V menjadi tegangan stabil yang sesuai untuk sensor dan ESP32. LCS I2C terhubung melalui modul PCF8574, sehingga komunikasi antara LCD dan ESP32 menjadi lebih efisien. Arsitektur ini memastikan bahwa setiap sensor dapat diaktifkan secara dinamis, dan data dapat dipantau baik secara lokal melalui LCD maupun secara jarak jauh melalui koneksi Wi-Fi ke Firebase.

Pengembangan Software

Firebase database digunakan sebagai pusat penyimpanan data pada sistem yang dikembangkan. Mikrokontroler ESP32 mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke Firebase dalam format JSON melalui protokol HTTP menggunakan REST API.



Gambar 3. Diagram Skematik Rangkaian Sistem Monitoring Kualitas Air

Setiap data yang masuk tersimpan secara *real-time* dan dapat diakses oleh aplikasi. Firebase dipilih karena mendukung sinkronisasi data secara cepat dan fleksibel terhadap perangkat IoT. Dengan demikian, Firebase berperan sebagai penghubung utama antara mikrokontroler dan aplikasi website dalam menyediakan data monitoring yang kontinyu dan akurat.

Kemudian dalam perancangan *software* selanjutnya yaitu pengembangan *dashboard* monitoring. *Dashboard* monitoring dirancang menggunakan Node.js sebagai *backend* unntuk mengelola komunikasi antara website dan Firebase. Node.js memproses permintaan data, mengambil pembaruan dari basis data *cloud*, dan meneruskannya ke antarmuka pengguna.

Antarmuka website dikembangkan menggunakan HTML untuk struktur halaman, CSS untuk pengaturan tampilan, dan JavaScript untuk mengambil serta memperbarui data secara *real-time*. Dashboard monitoring menampilkan sensor, grafik tren kualitas air, dan status sistem, serta menyedikan fitur tombol kontrol relay jarak jauh untuk mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat sensor. Dengan kombinasi ini, website memberikan fitur monitoring yang responsif, interaktif dan mudah digunakan oleh pengguna.

Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap sensor yang digunakan dalam sistem mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat dan konsisten. Proses kalibrasi dilakukan berbeda untuk masing-masing sensor berdasarkan karakteristik dan prinsip kerjanya, namun keseluruhannya mengacu pada prosedur pembandingan antara nilai keluaran sensor dengan nilai acuan dari alat ukur standar yang telah dikalibrasi.

Kalibrasi sensor pH dilakukan dengan membandingkan pembacaan nilai tegangan dari sensor dengan pH meter laboratorium yang telah dikalibrasi menggunakan larutan buffer standar. Data hasil pengukuran kedua perangkat kemudian dianalisis menggunakan persamaan regresi linier yang digunakan untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor pada sistem.

Sensor TDS dikalibrasi dengan menggunakan TDS meter standar. Setiap data hasil pengukuran dibandingkan dengan keluaran sensor TDS, kemudian dimodelkan menggunakan persamaan polinommial orde tiga. Model ini dipilih karena memberikan kesesuaian yang lebih baik terhadap karakteristik non-linier sensor TDS pada rentang pengukuran tertentu.

Sementara itu, sensor *turbidity* dikalibrasi menggunakan beberapa larutan standar dengan tingkat kekeruhan tertentu. Tegangan keluaran sensor kemudian dipetakan terhadap nilai NTU menggunakan persamaan polinomial orde dua untuk menghasilkan kurva karakteristik sensor yang stabil.

Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan untuk mengetahui sejauh mana nilai yang dihasilkan sensor mendekati nilai sebenarnya yang diukur menggunakan alat standar. Pada penelitian ini, akurasi dievaluasi dengan membandingkan nilai besaran sensor dengan nilai dari alat ukur yang telah terkalibrasi, yaitu pH meter, TDS meter dan *turbidity meter*.

Pengujian dilakukan pada lima jenis sampel air dengan karakteristik berbeda, seperti yang ditunjukan pada **Tabel 2**.

Tabel. 2 Jenis Sampel Pengujian

No	Sampel	Keterangan
1	A	Air Mineral Merk A
2	B	Air Mineral Merk B
3	C	Air Mineral Merk C
4	D	75 mL aquades + 3 tetes cuka
5	E	75 mL aquades + 3 tetes santan

Setiap sampel diuji sebanyak 10 kali pengulangan untuk setiap parameter yang diukur, yaitu pH, TDS, dan *turbidity*. Pengulangan pengukuran ini bertujuan untuk mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor (presisi) serta melihat kestabilan sistem dalam melakukan akuisisi data. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi variasi nilai yang diperoleh dari setiap sampel.

Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan beberapa metrik kesalahan yaitu *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentege Error* (MAPE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE)[15][16].

MAE mengukur rata-rata selisih absolute antara nilai sensor dan nilai acuan. Semakin kecil nilai MAE, semakin baik akurasi sensor. Persamaan MAE dituliskan pada **Persamaan 1**, dengan n jumlah data, y_i adalah nilai acuan dan $\hat{y}_i$ adalah nilai sensor.

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

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \quad (2)$$

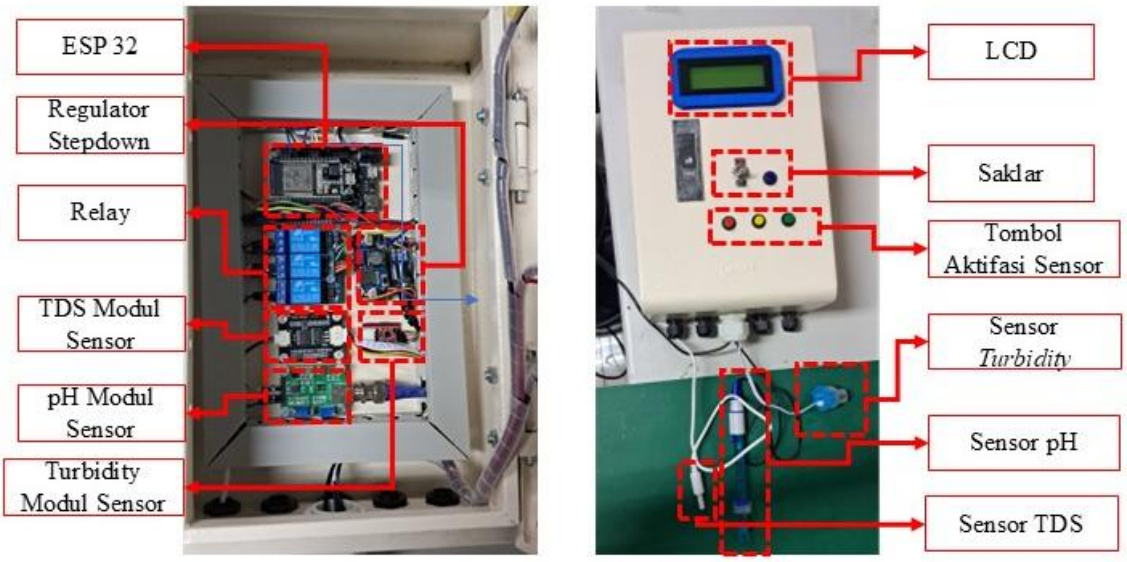
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

MAPE menggambarkan persentase rata-rata kesalahan relatif terhadap acuan. Aspek ini sering digunakan untuk menilai performa sensor dalam konteks sistem monitoring karena memberikan interpretasi kesalahan dalam bentuk persentase. Persamaan MAPE ditunjukkan pada **Persamaan 2**.

RMSE mengukur akar dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai sensor dan nilai acuan. Persamaan RMSE dituliskan pada **Persamaan 3**. Pada proses pengujian setiap nilai sensor diukur secara berulang dan dibandingkan dengan nilai referensi dari alat ukur standar. nilai kesalahan dihitung berdasarkan tiga metrik tersebut untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai akurasi pembacaan sensor. Hasil analisis akurasi dari masing-masing sensor disajikan dan dibahas lebih lanjut pada bagian Hasil dan Pembahasan.

Pengujian Sistem IoT Berbasis Skenario

Pengujian sistem dilakukan menggunakan pendekatan berbasis skenario untuk memastikan seluruh fungsi utama pada sistem monitoring kualitas air dapat berjalan dengan baik. Pengujian ini difokuskan untuk menguji fungsi-fungsi sistem bekerja sesuai dengan semestinya.



Gambar 4. Tampilan Implementasi *Hardware* Sistem Monitoring Kualitas Air

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Hardware

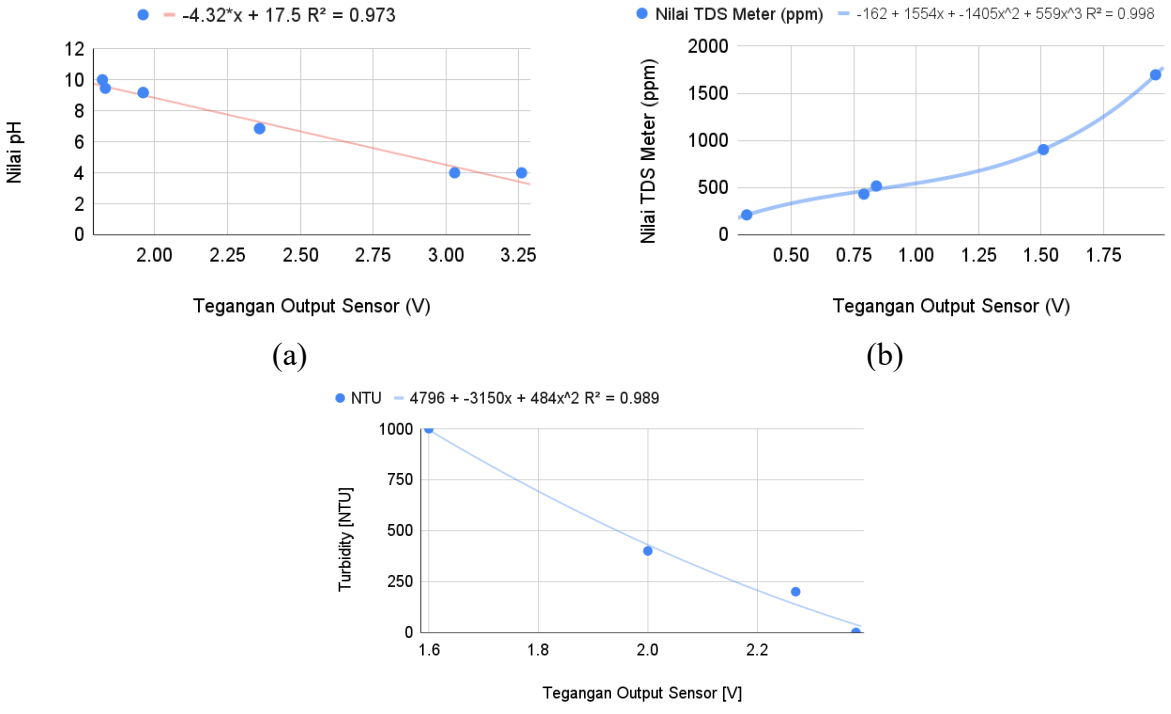
Prototipe sistem yang telah dikembangkan ditunjukkan pada **Gambar 4**. Seluruh komponen dirangkai dan dipasang sedemikian rupa agar memudahkan proses pengujian. Seluruh komponen diletakkan pada box panel, agar terhindar dari gangguan lingkungan (**Gambar 4**. Kiri). Modul ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang terhubung dengan sensor pH, TDS, dan *turbidity*, serta modul relay yang mengatur fungsi on/off sensor. Setiap sensor ditempatkan pada posisi yang memungkinkan probe atau elektroda bersentuhan langsung dengan air.

Rangkaian catu daya disusun menggunakan regulator step down LM2596 untuk menurunkan tegangan dari adaptor ke tegangan 5 V agar aman bagi sensor dan mikrokontroler. Penataan modul di dalam panel dibuat rapi agar alur kabel mudah ditelusuri dan meminimalkan gangguan pada jalur sinyal analog sensor.

Tampilan luar perangkat ditunjukkan pada **Gambar 4** (kanan). LCD 16 x 2 ditempatkan pada bagian depan box panel sehingga memudahkan pengguna untuk melihat hasil pembacaan sensor secara langsung. Selain itu disediakan saklar utama untuk menyalakan sistem serta tiga tombol aktivasi sensor yang terhubung ke modul relay untuk mengaktifkan atau menonaktifkan masing-masing sensor.

Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan untuk memperoleh hubungan antara tegangan keluaran sensor dan nilai referensi yang diukur menggunakan alat ukur standar. Proses kalibrasi dilakukan untuk ketiga sensor yaitu, sensor pH, TDS dan *turbidity*. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Kurva hasil kalibrasi untuk (a) sensor pH, (b) sensor TDS, dan (c) sensor *turbidity* dengan karakteristik sensor yang berbeda satu sama lain.

Gambar 5(a) menunjukkan hubungan antara teganagan keluaran modul pH dan nilai pH yang diperoleh dari pH meter terkalibrasi. Pola hubungan bersifat linier. Model regresei linier yagn diperoleh yaitu

$$pH = -4{,}322\,V + 17{,}5 \quad (4)$$

dengan nilai koefesien determinasi $R^2 = 0{,}973$. Nilai ini menunjukkan bahwa model linier sangat sesuai dengan karekteristik sensor pada rentang pengukuran yang digunakan.

Hasil kalibrasi sensor TDS ditunjukkan pada **Gambar 5 (b)**. Sensor TDS menunjukkan karakteristik non-linier, dengan model polinomial orde tiga yang sesuai dengan kurva pembacaan. Persamaan polinomial orde tiga yang diperoleh yaitu

$$TDS = -162 + 1554V - 1405V^2 + 559V^3 \quad (5)$$

dengan nilai $R^2 = 0{,}998$. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model polinomial orde tiga mampu menggambarkan karakteristik sensor secara akurat.

Gambar 5 (c) menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran sensor *turbidity* dan nilai NTU dari larutan standar. Model terbaik diperoleh menggunakan regresi polinomial order dua

$$NTU = 4796 - 3150V + 484V^2 \quad (6)$$

dengan $R^2 = 0{,}989$. Nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa model sesuai untuk digunakan dalam konversi tegangan menjadi nilai NTU dalam pengukuran.

Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan melakukan pengukuran tiga parameter fisis air yaitu pH, TDS, dan *turbidity* dari lima sampel air yang digunakan. Kelima sampel air tersebut yaitu sampel A merupakan air mineral merk A, sampel B merupakan air mineral merk B, sampel C merupakan air mineral merk C, Sampel D adalah larutan 75 mL aquades + 3 tetes air cuka, serta sampel E adalah larutan 75 mL aquades + 3 tetes santan kemasan. Kelima sampel diukur sebanyak 10 kali pengulangan untuk melihat akurasi dan presisi dari setiap sensor.

Setiap pengulangan juga dibandingkan dengan hasil pengukuran sampel menggunakan alat ukur terkalibrasi yaitu pH meter, TDS meter dan juga *turbidity* meter. Hasil ringkasan pengukuran ketiga sensor ditampilkan pada **Tabel 3**.

Hasil pengujian sensor pH terlihat bahwa hasil pembacaan pada kelima sampel memiliki kedekatan yang sangat baik dengan nilai yang ditunjukkan oleh pH meter terkalibrasi. Perbedaan antara rata-rata nilai sensor dan alat referensi pada masing-masing sampel relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa sensor pH bekerja secara akurat dalam rentang kondisi sampel yang diuji. Secara keseluruhan, akurasi tersebut tercermin dari nilai MAE sebesar 0,081, MAPE 1,34% dan RMSE 0,11, yang memperkuat bahwa kesalahan pembacaan sensor yang rendah dan konsisten. Selain itu, nilai MAPE hasil penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan nilai presentase *error* dari penelitian sebelumnya [2]. Hal ini menjelaskan bahwa sensor pH pada sistem ini memiliki tingkat kesalahan yang relatif lebih rendah. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh proses kalibrasi sensor, serta kondisi pengujian yang lebih terkontrol.

Secara teoritis, nilai pH dipengaruhi oleh konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam larutan, di mana perubahan komposisi kimia sampel akan berdampak langsung terhadap nilai pH yang terukur [14]. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa sensor pH mampu mengikuti perubahan nilai pada setiap sampel dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil.

Tabel. 3 Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH, TDS, dan *turbidity*

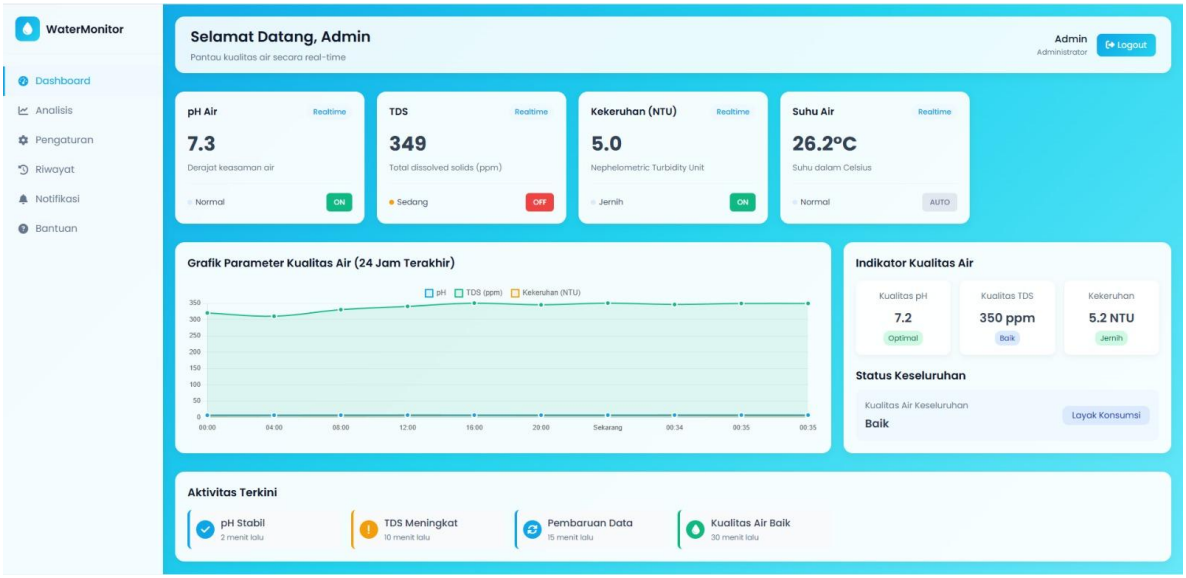
Sampel	Rata-rata nilai pH sensor	Rata-rata nilai pH meter	Rata-rata nilai TDS sensor	Rata-rata nilai TDS meter	Rata-rata nilai turbidity sensor	Rata-rata nilai turbidity meter
A	7,72	7,74	108,1	115	0,00	0,00
B	7,80	7,83	205,1	198	0,00	0,00
C	7,70	7,74	267,9	260	0,00	0,00
D	4,98	4,86	104,0	101	0,00	0,00
E	6,81	6,86	211,3	211	212,10	212,00
MAE	0,081		5,56		0,42	
MAPE (%)	1,34		3,46		0,20	
RMSE	0,11		6,63		1,19	

Pada pengujian sensor TDS, nilai rata-rata sensor menunjukkan pola yang konsisten mengikuti perubahan nilai acuan pada semua sampel. Meskipun terdapat selisih antara pembacaan sensor dan alat ukur terkalibrasi, perbedaan tersebut masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring kualitas air. Hal tersebut terlihat dari nilai MAE sebesar 5,56, yang menunjukkan adanya deviasi rata-rata sekitar 5-6 ppm. Namun demikian, nilai RMSE sebesar 6,63 menunjukkan bahwa variasi kesalahan antar pengukuran masih tergolong kecil dan stabil. Selain itu, nilai MAPE sebesar 3,46% menunjukkan tingkat kesalahan relatif yang rendah. Jika dikonversi menggunakan pendekatan (100% − MAPE), maka diperoleh tingkat akurasi sebesar 96,54%, yang sebanding dengan hasil penelitian sebelumnya [3] sebesar 96,973%.

Secara prinsip, sensor TDS bekerja berdasarkan konduktivitas listrik larutan, yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion terlarut dalam air [17]. Semakin tinggi kandungan zat terlarut, maka semakin besar nilai konduktivitas yang terukur, sehingga menghasilkan nilai TDS yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa sensor TDS mampu mengikuti perubahan nilai acuan pada berbagai sampel dengan pola yang konsisten.

Sementara itu, pada pengujian sensor *turbidity*, sampel A-D menunjukkan nilai 0 NTU yang sesuai dengan kondisi sampel yang jernih. Sementara pada sampel E diperoleh nilai 212, 1 NTU dan nilai tersebut memiliki nilai relatif sama dengan nilai alat terkaibrasi. Pengukuran ini menghasilkan MAE sebesar 0,42, MAPE 0,20% dan RMSE 1,19 yang menunjukkan bahwa sensor bekerja cukup baik dalam mendeteksi perbedaan tingkat kejernihan pada skala pengukuran yang digunakan. Selain itu, Nilai MAPE sebesar 0,2% pada sensor *turbidity* menunjukkan tingkat kesalahan yang rendah. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [3] yang melaporkan akurasi sebesar 95%, hasil ini mengindikasikan performa sistem yang baik, meskipun menggunakan metrik evaluasi yang berbeda.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga sensor mampu memberikan pembacaan yang medekati nilai referensi terkalibrasi. Deviasi yang muncul masih berada dalam batas wajar untuk



Gambar 6. Tampilan *Dashboard* Website Sistem Monitoring Kualitas Air

aplikasi monitoring kualitas air berbasis IoT, sehingga sistem dapat digunakan untuk pemantauan parameter pH, TDS, dan *turbidity* secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang cukup baik.

Hasil Pengujian Sistem IoT

Penelitian ini juga berhasil mengintgrasikan sistem *hardware* dengan sistem IoT berbasis Firebase. Tampilan antarmuka website monitoring yang dikembangkan ditunjukkan pada **Gambar 6**. Dashboard ini berfungsi sebagai media utama bagi pengguna untuk memantau kualitas air dan melakukan pengendalian sensor secara jarak jauh. Informasi yang ditampilkan pada dashboard meliputi nilai parameter pH, TDS, dan *turbidity* yangdiperoleh dari sensor secara *real-time*, serta grafik tren pembacaan sensor untuk memudahkan analisis perubahan kualitas air.

Selain fungsi pemantuan, website monitoring juga dilengkapi dengan fitur autentikasi pengguna dan tombol kendali *on/off* untuk setiap sensor. Fitur kendali ini terintegrasi dengan modul relay pada perangkat keras sehingga memungkinkan pengguna mengaktifkan atau menonaktifkan sensor sesuai kebutuhan, khususnya untuk mendukung pengelolaan konsumsi energi sistem.

Untuk memastikan bahwa seluruh fitur pada dashboard berjalan sesuai dengan perancangan, dilakukan pengujian sisstem berbasis skenario. Pengujian ini mencakup proses autentikasi pengguna, akses dashboard, kendali relay sensor, serta visualisasi data dalam bentuk grafik. Ringkasan hasil pengujian berbasis skenario tersebut disajikan pada **Tabel 4**.

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada **Tabel 4**, seluruh skenario yang diuji menunjukkan bahwa setiap fitur sistem berfungsi sesuai dengan perancangan. Seluruh fungsi utama, mulai dari autentikasi pengguna, akses dashboard, kendali *on/off* sensor, hingga visualisasi data, dapat dijalankan dengan baik tanpa ditemukan kegagalan pada skenario pengujian yang dilakukan.

Berdasarkan seluruh rangkaian pengujian yang elah dilakukan, baik pada aspek akurasi sensor maupun fungsionalitas sistem IoT, dapat dikatakan bahwa sistem monitoring kualitas air yang dikembangkan mampu bekerja secara andal dan terintegrasi. Sistem tidak hanya mampu

Tabel. 4. Hasil Pengujian Sistem IoT Berbasis Skenario

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian
1	Pembuatan akun pengguna	Akun berhasil dibuat dan tersimpan di sistem	Berhasil
2	Login pengguna (data benar)	Sistem mengarahkan pengguna ke halaman dashboard	Berhasil
3	Login pengguna (data salah)	Sistem menampilkan notifikasi kesalahan	Berhasil
4	Aktivasi relay sensor pH	Sensor pH aktif dan data ditampilkan pada dashboard	Berhasil
5	Nonaktif relay sensor pH	Sensor pH berhenti mengirimkan data	Berhasil
6	Aktivasi relay sensor TDS	Sensor TDS aktif dan data ditampilkan pada dashboard	Berhasil
7	Nonaktif relay sensor TDS	Sensor TDS berhenti mengirimkan data	Berhasil
8	Aktivasi relay sensor turbidity	Sensor turbidity aktif dan data ditampilkan	Berhasil
9	Nonaktif relay sensor turbidity	Sensor turbidity berhenti mengirimkan data	Berhasil
10	Visualisasi grafik data	Grafik diperbarui sesuai data terbaru	Berhasil

menyajikan data kualitas air secara *real-time* melalui antarmuka website, tetapi juga menyediakan fitur kendali sensor yang mendukung efisiensi penggunaan energi.

Dengan karakteristik tersebut, sistem ini berpotensi untuk diterapkan pada berbagai kebutuhan pemantauan kualitasi air, seperti pada jaringan distribusi air bersih masyarakat PDAM untuk memantau kondisi air secara berkala, pada industri air minum dalam kemasan sebagai alat pemantauan kualitas air proses produksi serta pada aplikasi lain yang memerlukan pengawasan kualitas air secara kontinyu dan jarak jauh. Fleksibilitas sistem berbasis IoT yang dikembangkan memungkinkan adaptasi lebih lanjut sesuai kebutuhan pengguna dan skala implementasi di lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT menggunakan ESP32 yang mampu melakukan pemantauan dan visualisasi parameter pH, TDS, dan *turbidity* secara *real-time*. Kontribusi utama terletak pada integrasi sistem monitoring dan kontrol sensor dalam satu platform berbasis website. Sistem menunjukkan performa yang baik dalam pengujian dan berpotensi diterapkan pada berbagai aplikasi pemantauan kualitas air. Pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan akurasi sensor dan perluasan skala implementasi serta pengembangan sistem yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi (Kemendiktisaintek) atas dukungan pendanaan melalui Hibah Penelitian Dosen Pemula (BIMA) Tahun 2025 dengan nomor kontrak 1483av/IT9.2.1/PT.01.03/2025.

DAFTAR PUSTAKA

[1] World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (UNICEF), *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines*, Geneva, Switzerland: WHO Press, 2017.

[2] I. Lubis and A. B. Pulungan, "Rancang bangun alat monitoring kualitas air berbasis online," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 462–472, 2023. https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.398

[3] R. Wahyudi, M. A. Putra, and L. H. Gunawan, "Rancang Bangun Alat Monitoring Kualitas Air Danau Perumahan Pinang Bahari," *PoliGrid*, vol. 4, no. 2, 2023. https://doi.org/10.46964/poligrid.v4i2.27

[4] R. I. Yaqin, L. I. Pamaharyani, Y. E. Priharanto, T. Lagsmana, and A. Alip, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Air Pada Perikanan Budidaya," *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 18, no. 3, pp. 354–362, 2024. https://doi.org/10.23960/elc.v18n3.2649

[5] I. A. Rozaq, D. Tauhida, R. Primadasa, and F. Setiawan, "Uji Linieritas Sensor Konduktivitas Pada Prototipe Pengukur Kualitas Air Tambak," *Journal Zetroem*, vol. 5, no. 2, pp. 136–139, 2023. https://doi.org/10.36526/ztr.v5i2.3122

[6] M. F. D. Nugroho, F. Hasan, and M. A. Yaqin, "Monitoring conductivity dan turbidity kualitas air baku pada demineral plan PLTU Paiton berbasis IoT dan PHP," *VoltComp: Journal of Electrical & Computer Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 9–15, 2025.

[7] P. Lindholm-Lehto, "Water quality monitoring in recirculating aquaculture systems," *Aquaculture, Fish and Fisheries*, vol. 3, no. 2, pp. 113–131, Apr. 2023. https://doi.org/10.1002/aff2.102

[8] R. P. Shete, A. M. Bongale, and D. Dharrao, "IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture," *MethodsX*, vol. 13, p. 102906, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102906 .

[9] N. Sari, Y. Savitri, S. C. Wahyono, J. Santoso, and A. V. Nasrulloh, "Design of IoT-based monitoring system for temperature and dissolved oxygen levels in catfish aquaculture pond water," *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems* (IJRES), vol. 13, no. 3, pp. 687–698, Nov. 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i3.pp687-698.

[10] S. Tansa, N. A. Latekeng, and R. Yunginger, "Monitoring kualitas air sungai (kekeruhan, suhu, TDS, pH) menggunakan mikrokontroler Atmega328," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 70–75, 2024.

[11] V. Lakshmikantha, A. Hiriyannagowda, A. Manjunath, A. Patted, J. Basavaiah, and A. A. Anthony, "IoT based smart water quality monitoring system,"

Global Transitions Proceedings, vol. 2, no. 2, pp. 181–186, 2021, doi: 10.1016/j.gltp.2021.08.062.

[12] H. E. Wowor, V. P. Rantung, and K. Santa, "Sistem kontrol kualitas air berbasis Internet of Things menggunakan metode prototype di Desa Pinapalangkow," *Innovative: Journal of Social Science Research*, vol. 4, no. 3, pp. 14529–14540, 2024. https://doi.org/10.31004/innovative.v4i3.11661

[13] A. Bagaskara, I. W. Ardiyasa, and I. M. D. Susila, "Kontrol dan monitoring kualitas air akuarium menggunakan protokol MQTT," *in Proc. Seminar Hasil Penelitian Informatika dan Komputer (SPINTER), Institut Teknologi dan Bisnis STIKOM Bali*, vol. 2, no. 1, pp. 775–780, Mar. 2025.

[14] M. H. F. M. Reduan, A. M. M. Ali, and M. R. B. Khan, "Water quality monitoring system based on microcontroller and LoRa," *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*, pp. 32–35, 2021.

[15] Willmott, C. J., and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate Research*, vol. 30, no. 1, pp. 79–82, 2005. http://dx.doi.org/10.3354/cr030079

[16] M. K. B. Islam, M. A. H. Newton, J. Trevathan, M. N. Halgamuge, and S. M. S. Islam, "Lite approaches for long-range multi-step water quality prediction," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 38, pp. 3755–3770, 2024. https://doi.org/10.1007/s00477-024-02770-8

[17] M. Makhdoumi Akram, M. Ramezannezhad, A. Nikfarjam, S. Kabiri, and S. Ehyaei, "A strip-based total dissolved solids sensor for water quality analysis," *IET Sci., Meas. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 208–218, 2022. https://doi.org/10.1049/smt2.12098