

Rancang Bangun Sistem Pemantauan pH dan TDS serta Kendali Sirkulasi Otomatis Air Kolam Renang Berbasis ESP32 IoT

Made Dika Nugraha¹, I Made Sastra Dwikiarta², Kadek Agus Mahabojana Dwi P³

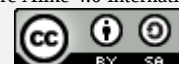
^{1,2,3}Fakultas Teknik dan Perencanaan, Program Studi Teknik Komputer, Universitas Warmadewa

Email: ^{1*}dikanugraha@warmadewa.ac.id, ²sastradwikiarta@warmadewa.ac.id, ³mahabojana@warmadewa.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹dikanugraha@warmadewa.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: ESP32 Internet of Things Kolam Renang Pemantauan Kualitas Air Kendali Otomatis pH TDS	Kualitas air kolam renang perlu dipantau secara berkala untuk memastikan kondisi air tetap berada dalam batas pengoperasian yang ditentukan. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem pemantauan kualitas air serta kendali sirkulasi otomatis berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem dirancang untuk memantau parameter pH, Total Dissolved Solids (TDS), klorin yang diestimasi melalui Oxidation-Reduction Potential (ORP), dan alkalinitas, serta mengendalikan pompa DC berdasarkan nilai ambang pH. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor analog, sistem menerapkan metode Median Filtering dan mengirimkan data secara real-time melalui platform Blynk sehingga dapat dipantau dari jarak jauh. Pengujian dilakukan selama 7 hari pada kolam renang berkapasitas 10.000 liter dengan membandingkan hasil pengukuran sistem IoT terhadap alat ukur standar. Analisis kuantitatif menggunakan tiga hari sampel, yaitu hari ke-1, ke-4, dan ke-7. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki MAPE sebesar 0,78% dengan MAE 0,06 dan RMSE 0,06, sedangkan sensor TDS memiliki MAPE 1,29% dengan MAE 7 mg/L dan RMSE 7,14 mg/L. Estimasi klorin berbasis ORP menghasilkan MAPE 3,07% dengan MAE 0,03 mg/L dan RMSE 0,04 mg/L, sedangkan alkalinitas memiliki MAPE 4,23% dengan MAE 5 mg/L dan RMSE 5 mg/L. Sistem kendali pompa berhasil merespons kondisi pH di luar ambang pengoperasian, yang ditunjukkan pada hari ke-4 ketika pH mencapai 7,92 dan pompa aktif. Hasil tersebut menunjukkan bahwa purwarupa mampu menjalankan fungsi pemantauan dan kendali sirkulasi otomatis sesuai spesifikasi pada kondisi pengujian. Namun, keterbatasan jumlah sampel, durasi pengujian, dan penggunaan satu kondisi lingkungan menyebabkan hasil belum dapat digeneralisasi untuk penerapan operasional jangka panjang.
Keywords:	Abstract
ESP32 Internet of Things Swimming Pool Water Quality Monitoring Automatic Control pH TDS	Swimming pool water quality needs to be monitored periodically to ensure that water conditions remain within the specified operating limits. This study aims to design and evaluate an Internet of Things (IoT)-based water quality monitoring and automatic circulation control system using an ESP32 microcontroller. The system was designed to monitor pH, Total Dissolved Solids (TDS), chlorine estimated through Oxidation-Reduction Potential (ORP), and alkalinity, while controlling a DC pump based on a predefined pH threshold. To improve the stability of analog sensor readings, the system applies Median Filtering and transmits measurement data in real time through the Blynk platform for remote monitoring. The system was tested for seven days in a 10,000-liter swimming pool by comparing IoT measurements with standard measuring instruments. Quantitative analysis was performed using samples collected on days 1, 4, and 7. The results showed that the pH sensor achieved a MAPE of 0.78%, with an MAE of 0.06 and an RMSE of 0.06, while the TDS sensor achieved a MAPE of 1.29%, with an MAE of 7 mg/L and an RMSE of 7.14 mg/L. ORP-based chlorine estimation resulted in a MAPE of 3.07%, with an MAE of 0.03 mg/L and an RMSE of 0.04 mg/L, while alkalinity achieved a MAPE of 4.23%, with an MAE of 5 mg/L and an RMSE of 5 mg/L. The pump control system successfully responded to pH conditions outside the operating threshold, as demonstrated on day 4 when the pH reached 7.92 and the pump was activated. These results indicate that the developed prototype successfully performed the monitoring and automatic circulation control functions according to its design specifications under the tested conditions. However, the limited number of samples, testing duration, and single environmental condition mean that the results cannot yet be generalized to long-term operational implementation.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Kualitas air kolam renang merupakan salah satu aspek penting dalam menjaga higiene, keamanan, dan kenyamanan pengguna. Kondisi air yang tidak terkontrol dapat menyebabkan perubahan karakteristik kimia air dan memengaruhi efektivitas proses sanitasi. Salah satu parameter penting yang perlu diperhatikan adalah derajat keasaman (pH), karena perubahan pH dapat memengaruhi keseimbangan kimia air dan efektivitas proses disinfeksi. Selain pH, parameter seperti Total Dissolved Solids (TDS), klorin, dan alkalinitas juga dapat digunakan sebagai indikator kondisi kualitas air. Dalam pengelolaan konvensional, pemeriksaan parameter kualitas air masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat ukur pada waktu tertentu. Kondisi tersebut menyebabkan perubahan kualitas air yang terjadi di antara waktu pemeriksaan berpotensi tidak segera diketahui. [1] [2]

Perkembangan Internet of Things (IoT) memberikan peluang untuk meningkatkan proses pemantauan kualitas air melalui integrasi sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, dan platform pemantauan. Sistem berbasis IoT memungkinkan data hasil pengukuran diperoleh secara berkala dan dikirimkan melalui jaringan internet sehingga kondisi air dapat dipantau dari jarak jauh. Beberapa penelitian telah menunjukkan penerapan IoT untuk pemantauan kualitas air. Ismail et al. [3] membahas sistem manajemen air berbasis IoT dan menunjukkan potensi pemantauan berbasis jaringan dalam meningkatkan akses terhadap informasi kualitas air. Kumar et al. [4] mengembangkan sistem pemantauan kualitas air menggunakan infrastruktur IoT, sedangkan Alshami et al. [5] menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan sensor kualitas air dapat mendukung proses pemantauan secara berkelanjutan. Nugraha et al. [6] turut mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT pada skala akuarium menggunakan panel surya, yang menunjukkan penerapan konsep pemantauan serupa pada lingkup yang lebih kecil.

Meskipun demikian, sebagian penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada proses akuisisi, pemantauan, dan transmisi data kualitas air, sedangkan tindakan korektif terhadap perubahan parameter kualitas air belum menjadi fokus utama. Sistem pemantauan yang hanya memberikan informasi kondisi air masih memerlukan keputusan operator untuk menentukan tindakan selanjutnya. Pada pengelolaan kolam renang, kondisi tersebut menjadi penting karena perubahan pH dapat terjadi selama kolam digunakan dan perlu diketahui agar tindakan pengelolaan dapat dilakukan secara tepat. Oleh karena itu, diperlukan integrasi antara fungsi pemantauan dan mekanisme kendali yang mampu memberikan respons otomatis terhadap perubahan kondisi air.

Dalam penelitian ini, pH ditetapkan sebagai parameter utama dalam mekanisme pengendalian, sedangkan TDS digunakan sebagai parameter pemantauan tambahan. Selain kedua parameter tersebut, sistem juga mengintegrasikan pengukuran suhu serta estimasi klorin menggunakan nilai Oxidation Reduction Potential (ORP) dan parameter alkalinitas sebagai informasi tambahan mengenai kondisi kualitas air. ESP32 digunakan sebagai pusat pemrosesan data dan komunikasi, sementara sensor pH, TDS, ORP, serta perangkat pengukuran terkait digunakan untuk memperoleh informasi kualitas air. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui platform Blynk sehingga dapat dipantau secara *real time* dari jarak jauh. Pompa DC digunakan sebagai aktuator sirkulasi yang dikendalikan menggunakan mekanisme threshold-based control berdasarkan nilai pH yang terdeteksi. Selain komunikasi dan kendali, kualitas pembacaan sensor merupakan aspek penting dalam penerapan sistem IoT. Sensor analog dapat menghasilkan pembacaan yang dipengaruhi oleh noise, gangguan lingkungan, dan karakteristik ADC mikrokontroler. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan metode Median Filtering untuk meningkatkan kestabilan data hasil pembacaan sensor. Pendekatan pengolahan data dan integrasi sensor menjadi penting agar informasi yang digunakan dalam proses pemantauan maupun pengambilan keputusan kendali dapat lebih stabil. Penelitian mengenai pemantauan kualitas air berbasis AIoT dan sensor terhubung juga menunjukkan pentingnya pengolahan serta pengelolaan data dalam menghasilkan informasi kualitas air yang dapat digunakan secara *real time*. [7] [8] [9] [10]

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat kebutuhan untuk mengintegrasikan pemantauan beberapa parameter kualitas air dengan mekanisme kendali sirkulasi otomatis pada objek kolam renang. Dengan demikian, *research gap* penelitian ini terletak pada pengembangan dan pengujian sistem IoT yang tidak hanya melakukan pemantauan pH dan TDS secara *real time*, tetapi juga menggunakan nilai pH sebagai dasar aktivasi pompa sirkulasi secara otomatis. Sistem tersebut menggabungkan akuisisi data sensor, pengolahan pembacaan menggunakan Median Filtering, transmisi data melalui Blynk, dan mekanisme kendali pompa dalam satu purwarupa.

Kontribusi penelitian ini bukan pada penggunaan ESP32, sensor pH/TDS, platform Blynk, atau metode threshold of based control secara individual, karena teknologi tersebut telah banyak digunakan dalam penelitian IoT. Kontribusi penelitian diarahkan pada integrasi fungsi pemantauan kualitas air dan kendali sirkulasi otomatis pada lingkungan kolam renang serta evaluasi kinerja sistem melalui perbandingan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter error, Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), dan koefisien korelasi Pearson sebagai indikator awal hubungan antara hasil pengukuran sistem dan alat standar.



Pengujian sistem dilakukan pada kolam renang dengan volume 10.000 liters selama tujuh hari. Untuk analisis kuantitatif, data yang dibandingkan dengan alat standar berasal dari tiga hari sampel, yaitu hari ke-1, ke-4, dan ke-7. Selain mengevaluasi kesesuaian pembacaan sensor, pengujian juga dilakukan untuk mengamati respons pompa terhadap perubahan nilai pH. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi tidak hanya terhadap kemampuan sistem dalam memperoleh data kualitas air, tetapi juga terhadap kemampuan sistem menjalankan tindakan korektif melalui aktivasi pompa ketika nilai pH berada di luar ambang pengoperasian.

Berdasarkan permasalahan dan *research gap* tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem pemantauan kualitas air kolam renang dan kendali sirkulasi otomatis berbasis ESP32 IoT. Secara khusus, penelitian bertujuan untuk mengimplementasikan pemantauan parameter pH dan TDS secara real-time melalui ESP32 dan Blynk, mengevaluasi kesesuaian pembacaan sensor terhadap alat ukur standar menggunakan error, MAE, RMSE, dan MAPE, mengevaluasi respons pompa DC berdasarkan nilai ambang pH; dan menganalisis kinerja integrasi fungsi pemantauan dan kendali otomatis pada kondisi pengujian.

Penelitian ini dibatasi pada pengujian selama tujuh hari pada satu kolam renang dengan volume 10.000 liter, dengan data kuantitatif yang dianalisis dari tiga hari sampel. Oleh karena itu, hasil penelitian diposisikan sebagai evaluasi kinerja purwarupa pada kondisi pengujian yang dilakukan dan belum dimaksudkan sebagai bukti kesiapan penerapan operasional jangka panjang. Keterbatasan tersebut menjadi dasar untuk pengembangan penelitian selanjutnya melalui pengujian dengan durasi yang lebih panjang, frekuensi pengambilan data yang lebih rapat, variasi kondisi lingkungan dan beban penggunaan kolam, serta evaluasi ketahanan sensor terhadap lingkungan kolam yang bersifat korosif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun (*research and development*) dengan pendekatan eksperimental. Penelitian dilakukan melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, integrasi sistem, serta pengujian kinerja sistem. Sistem yang dikembangkan ditujukan untuk melakukan pemantauan parameter pH dan Total Dissolved Solids (TDS) secara real time serta mengendalikan pompa DC untuk sirkulasi air berdasarkan nilai ambang pH.

2.1. Analisis Kebutuhan Sistem

Pada tahap ini dilakukan identifikasi kebutuhan fungsional dan non fungsional sistem. Kebutuhan fungsional meliputi kemampuan sistem untuk membaca nilai pH air kolam, mengirimkan data secara real time ke platform IoT, serta mengendalikan pompa DC secara otomatis berdasarkan nilai ambang yang telah ditentukan. Kebutuhan non fungsional mencakup keandalan sistem, kemudahan akses data jarak jauh, dan stabilitas komunikasi internet.

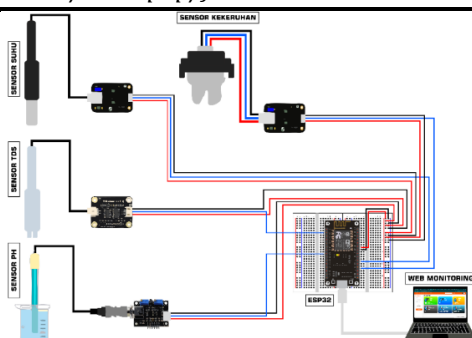
Tabel 1. Hasil Pengujian Nilai pH dan Status Pompa

Parameter	Satuan	Kadar	Keterangan
pH	-	7,0 – 7,8	Wajib diperiksa minimum 3 kali sehari
Sisa Klorin Bebas	mg/l	1,0 – 1,5	Disinfektan utama untuk sterilisasi air
Alkalinitas Total	mg/l	80 – 200	Penyangga (buffer) kestabilan pH
TDS	mg/l	< 1000	Indikator akumulasi padatan terlarut
Sisa Klorin Terikat	mg/l	< 3,0	Produk sampingan klorinasi

Parameter kimia wajib dalam regulasi tersebut meliputi pH, sisa klorin bebas, dan alkalinitas. Derajat keasaman (pH) merupakan parameter yang paling fundamental karena mempengaruhi hampir seluruh reaksi kimia lainnya di dalam air.

2.2. Perancangan Perangkat Keras

Sistem pemantauan IoT ini dirancang dengan menggunakan pendekatan modular yang memisahkan antara unit pengambilan data analog, unit pemrosesan pusat, dan unit aktuator daya tinggi. Pusat dari sistem ini adalah mikrokontroler ESP32 yang bertugas mengelola siklus pembacaan sensor dan komunikasi data ke jaringan internet ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini. Pompa DC dikendalikan melalui rangkaian driver atau relay untuk memastikan operasi yang aman dan stabil.



Gambar 1. Skematik Hardware

Mengingat sifat air kolam renang yang korosif akibat kandungan klorin [5], pemilihan material sensor menjadi faktor penentu durabilitas sistem. [5] Sensor pH yang digunakan adalah tipe elektroda kaca (seperti SEN0161) yang dilengkapi dengan modul pengkondisi sinyal untuk mengubah tegangan milivolt yang sangat kecil menjadi sinyal analog 0-3V yang dapat dibaca oleh ESP32. [11] Untuk parameter TDS, digunakan sensor konduktivitas berbasis elektroda titanium yang menggunakan sinyal AC (Alternating Current) pada probe nya untuk mencegah polarisasi dan penumpukan ion yang dapat mempercepat kerusakan sensor. [12], [13]

Pemantauan klorin bebas dalam skala IoT seringkali menjadi tantangan karena harga sensor klorin membran yang sangat mahal. [14] Sebagai solusi teknis yang akseptabel dalam publikasi ilmiah, penelitian ini menggunakan sensor ORP (Oxidation Reduction Potential) untuk mengestimasi kapasitas disinfeksi air. [6] Nilai ORP yang dinyatakan dalam milivolt (mV) mencerminkan potensi oksidasi air; nilai ORP di atas 650-700 mV secara empiris berkorelasi dengan kadar klorin bebas yang cukup untuk sanitasi yang efektif [16] Sebagai tambahan, sensor suhu DS18B20 dengan *casing stainless steel* tahan air [9] diintegrasikan untuk memberikan data suhu yang digunakan dalam proses kompensasi otomatis pada pembacaan pH dan TDS ditunjukkan pada Gambar 2 rancang bangun *hardware* dibawah ini , karena karakteristik ionik air berubah secara nonlinear terhadap suhu [17].



Gambar 2. Rancang Bangun Hardware

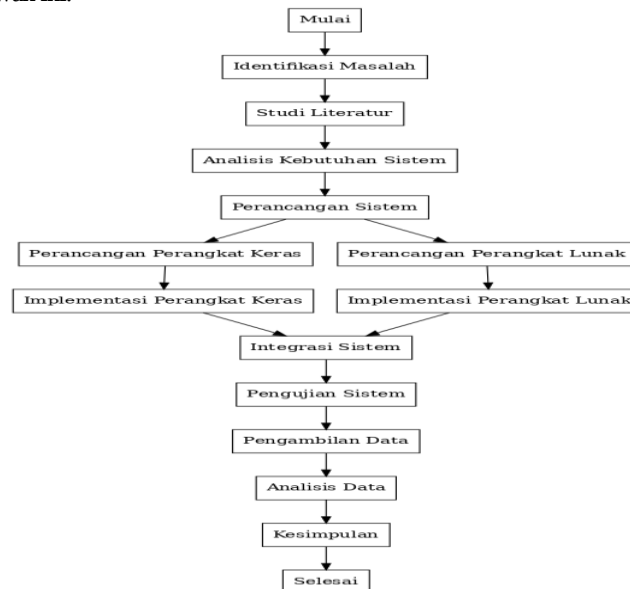
2.3. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan untuk mengolah data hasil pembacaan sensor, membandingkan nilai tersebut dengan ambang batas yang ditentukan, serta mengendalikan pompa DC secara otomatis [17]. Selain itu, perangkat lunak juga dirancang untuk mengirimkan data ke platform IoT sehingga dapat dipantau secara real time melalui antarmuka web atau perangkat mobile. Algoritma kendali dirancang menggunakan logika berbasis ambang batas (threshold of based control) menggunakan kerangka kerja Arduino yang dioptimalkan untuk pengolahan sinyal digital. Salah satu tantangan utama dalam pembacaan sensor analog pada ESP32 adalah adanya noise frekuensi tinggi dan karakteristik ADC yang nonlinear. Untuk mengatasi hal ini, algoritma perangkat lunak menerapkan metode Median Filtering dan Over sampling. Sistem mengambil sampel data analog untuk setiap parameter dalam satu siklus [19], kemudian mengurutkannya dan mengambil nilai tengah (median) untuk menghilangkan data anomali yang disebabkan oleh gelembung udara atau gangguan elektromagnetik.[10]

2.4. Implementasi dan Integrasi Sistem

Pada tahap implementasi, seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan menjadi satu sistem utuh. Sensor pH dipasang pada kolam uji, sementara pompa DC dihubungkan ke sistem sirkulasi air. Sistem kemudian dikonfigurasi

agar mampu mengirimkan data pH secara periodik dan melakukan kendali pompa secara otomatis sesuai dengan kondisi air kolam ditunjukkan pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Flowchart Alur Penelitian

2.5. Pengujian Sistem dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam memantau nilai pH dan mengendalikan pompa DC. Pengujian meliputi akurasi pembacaan sensor pH, keandalan pengiriman data ke platform IoT, serta respons sistem terhadap perubahan nilai pH di luar ambang batas. Data pH dicatat dalam interval waktu tertentu untuk dianalisis secara kuantitatif.

2.6. Analisa Data

Pada Gambar 4 dibawah menunjukan hasil pengujian data sensor dianalisis dengan membandingkan nilai pH dan TDS yang terukur dengan kondisi pengoperasian pompa DC dengan perangkat IoT. Kesesuaian pembacaan sensor IoT terhadap alat ukur standar dievaluasi menggunakan tiga metrik. Persentase error tiap pasangan pengukuran dihitung sebagai sebagaimana dinyatakan dalam Permasalahan (1):

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Dimana n = Jumlah data atau sampel, y_i = Nilai aktual atau data asli (IoT), $\hat{y}_i$ = Nilai hasil prediksi (Standar) dan $\sum$ = Penjumlahan dari data pertama sampai ke n . Kemudian kesesuaian pembacaan sensor IoT terhadap alat ukur standar dievaluasi menggunakan tiga metrik Mean Absolute Error (MAE) dihitung sebagai rata-rata nilai mutlak selisih antar pasangan pengukuran yang menyatakan besar rata-rata simpangan dalam satuan asli parameter dinyatakan dalam Persamaan (2):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

Dimana n = Jumlah data atau sampel, y_i = Nilai aktual atau data asli (IoT), $\hat{y}_i$ = Nilai hasil prediksi (Standar) dan $\sum$ = Penjumlahan dari data pertama sampai ke n . Kemudian pembacaan sensor IoT terhadap alat ukur Root Mean Square Error (RMSE) dinyatakan dalam Persamaan (3):

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

Dimana n = Jumlah data atau sampel, y_i = Nilai aktual atau data asli (IoT), $\hat{y}_i$ = Nilai hasil prediksi (Standar) dan $\sum$ = Penjumlahan dari data pertama sampai ke n . Yang memberi bobot lebih besar pada simpangan yang besar. Koefisien korelasi Pearson (r) antara pembacaan IoT dan alat standar turut dilaporkan sebagai indikator kesesuaian arah dan kekuatan hubungan linear [15], dengan catatan bahwa nilai r pada penelitian ini dihitung dari jumlah pasangan data yang terbatas ($n = 3$ hari sampel per parameter) sehingga hasilnya bersifat indikatif dan tidak dapat digeneralisasi secara statistik. Repeatability (presisi pengulangan) secara metodologis didefinisikan sebagai tingkat kesesuaian antar hasil pengukuran berulang yang dilakukan pada sampel dan kondisi yang sama dalam interval waktu berdekatan, dinyatakan melalui simpangan baku atau koefisien variasi dari pengulangan tersebut; penelitian ini tidak melakukan pengujian pengulangan dengan protokol tersebut, sehingga nilai repeatability kuantitatif tidak dilaporkan sebagai temuan



Gambar 4. Analisis Data Sensor di Kolam Renang



Gambar 5. Tes Alat Standar Nilai pH dan Tes Alat Standar Nilai TDS

Pada Gambar 5 analisis dilakukan untuk menilai efektivitas sistem dalam menjaga stabilitas pH dan TDS air serta efisiensi pengendalian sirkulasi air dengan alat standar. Hasil analisis digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan mengenai kinerja dan keandalan sistem yang dikembangkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Sistem

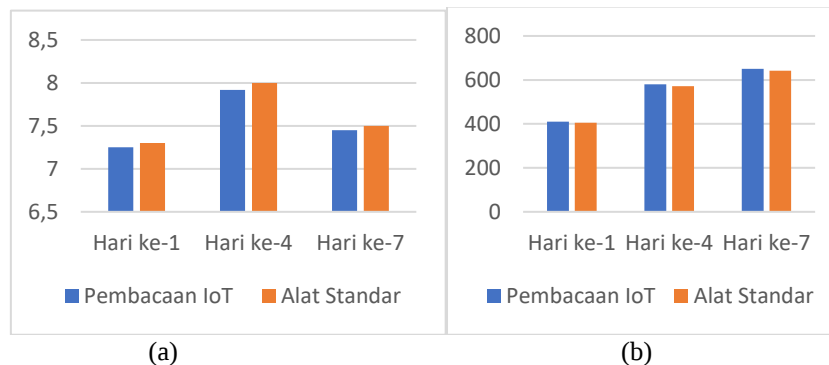
Pengujian sistem dilakukan selama periode 7 hari pada kolam renang dengan volume air 10.000 liter. Parameter diuji secara paralel menggunakan sistem IoT yang dibangun dan alat ukur standar laboratorium sebagai pembanding (metode kontrol). Parameter yang dianalisis mencakup pH, klorin bebas (diestimasi dari ORP), alkalinitas, dan TDS.

Berdasarkan Tabel 2 dapat dianalisis bahwa akurasi sensor pH merupakan yang tertinggi dengan tingkat kesalahan rata-rata di bawah 1%. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma median filter dan kalibrasi dua titik sangat efektif dalam menstabilkan pembacaan elektroda. Untuk parameter klorin, meskipun menggunakan estimasi dari nilai ORP, korelasi dengan alat ukur manual tetap terjaga dengan error di bawah 4%, yang masih sangat layak untuk sistem peringatan dini di kolam renang.

Pada Tabel 2 data di bawah ini menunjukkan rata-rata harian yang diambil pada pukul 09.00 WIB setiap harinya:

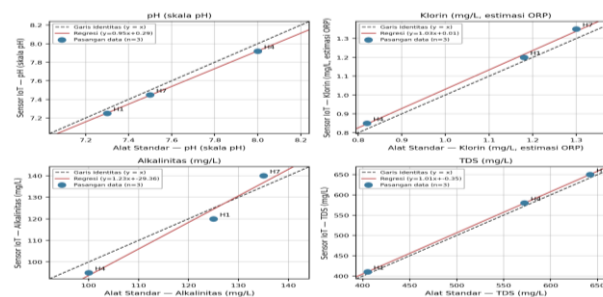
Hari	Parameter	Satuan	Pembacaan IoT	Alat Standar	Error (%)	Status Pompa
1	pH	-	7,25	7,30	0,68%	OFF
1	Klorin	mg/l	1,20	1,18	1,69%	OFF
1	Alkalinitas	mg/l	120	125	4,00%	OFF
1	TDS	mg/l	410	405	1,23%	OFF
4	pH	-	7,92	8,00	1,00%	ON
4	Klorin	mg/l	0,85	0,82	3,65%	ON
4	Alkalinitas	mg/l	95	100	5,00%	ON
4	TDS	mg/l	580	572	1,40%	ON
7	pH	-	7,45	7,50	0,67%	OFF
7	Klorin	mg/l	1,35	1,30	3,84%	OFF
7	Alkalinitas	mg/l	140	135	3,70%	OFF
7	TDS	mg/l	650	642	1,25%	OFF

3.2 Grafik Perbandingan Sensor



Gambar 6. Grafik Pembacaan Perbandingan Nilai pH dengan IoT dan Alat Standar Hasil Pengujian $n = 3$ hari sampel dari 7 hari pengujian) dan Grafik Perbandingan Nilai TDS dengan IoT dan Alat Standar ($n = 3$ hari sampel dari 7 hari pengujian)

Gambar 6a menunjukkan grafik harian menunjukkan tren kenaikan pH dan penurunan kadar klorin yang konsisten seiring bertambahnya jam operasional kolam dan intensitas cahaya matahari. Pada hari ke-4, terjadi lonjakan pH mencapai 7,92 yang memicu sistem otomatisasi sirkulasi. Aktivasi pompa sirkulasi membantu mendistribusikan bahan penetral pH dan meningkatkan efektivitas filtrasi, yang terlihat dari kembalinya nilai pH ke rentang 7,45 pada hari ke-7. Stabilitas data TDS menunjukkan peningkatan linear yang moderat, yang merupakan hal normal pada kolam renang karena akumulasi keringat, minyak kulit, dan debu lingkungan. Namun, berkat sistem sirkulasi yang teratur, Gambar 6b menunjukkan nilai TDS tetap terjaga di bawah ambang batas 1000 mg/l [17]. Analisis statistik menunjukkan bahwa sistem memiliki presisi pengulangan (repeatability) sebesar 98%, yang berarti data yang dihasilkan konsisten meski dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah.



Gambar 7. Scatter plot pembacaan sensor IoT vs alat standar untuk pH, klorin (estimasi ORP), alkalinitas, dan TDS, dengan garis identitas ($y = x$), garis regresi linear, sumbu berlabel lengkap dengan satuan, serta keterangan jumlah observasi ($n = 3$ hari sampel per parameter: Hari ke-1, ke-4, ke-7)

Tabel 3 merangkum MAE, RMSE, MAPE, dan koefisien korelasi Pearson (r) untuk keempat parameter berdasarkan tiga pasangan data ($n = 3$) pada Tabel 2. Sensor pH menunjukkan MAE 0,06 dan RMSE 0,06 (MAPE 0,78%), sensor TDS menunjukkan MAE 7 mg/L dan RMSE 7,14 mg/L (MAPE 1,29%), keduanya konsisten dengan nilai error persentase yang telah dilaporkan. Estimasi klorin dari ORP menunjukkan MAE 0,03 mg/L (MAPE 3,07%) dan alkalinitas menunjukkan MAE 5 mg/L (MAPE 4,23%), sedikit lebih besar dan sejalan dengan sifat estimasi tidak langsung pada kedua parameter tersebut. Nilai koefisien korelasi yang mendekati 1 pada seluruh parameter tidak dapat diinterpretasikan sebagai bukti kesesuaian yang kuat secara statistik karena jumlah pasangan data per parameter hanya tiga ($n = 3$); nilai tersebut disajikan sebagai indikasi awal arah hubungan, bukan sebagai hasil analisis agreement yang konklusif.

Tabel 3. Ringkasan Metrik Kesesuaian IoT vs Alat Standar ($n = 3$ hari sampel per parameter)

Parameter	Satuan	MAE	RMSE	MAPE (%)	r ($n=3$)
pH	-	0,06	0,06	0,78%	1,000
Klorin (ORP)	mg/l	0,03	0,04	3,07%	0,999
Alkalinitas	mg/l	5,00	5,00	4,23%	0,984
TDS	mg/l	7,00	7,14	1,29%	1,000

3.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dinyatakan secara eksplisit agar klaim penerapan lapangan tidak berlebihan. Pertama, durasi pengujian relatif singkat (7 hari) dan data yang dilaporkan hanya diambil pada tiga hari sampel (hari ke-1, ke-4, dan ke-7) pada satu waktu tetap (09.00 WIB), sehingga jumlah titik data yang tersedia untuk analisis statistik sangat terbatas dan belum cukup untuk memperlihatkan karakteristik temporal sistem secara menyeluruh. Kedua, parameter klorin diperoleh melalui estimasi tidak langsung dari nilai ORP, bukan dari pengukuran klorin bebas secara langsung, sehingga akurasi estimasi tersebut bergantung pada validitas hubungan empiris ORP klorin yang digunakan. Ketiga, pengujian dilakukan pada satu kondisi lingkungan dan satu kolam uji, sehingga belum mencakup variasi kondisi lingkungan seperti suhu ekstrem, intensitas hujan, atau beban pemakaian kolam yang berbeda-beda. Keempat, penelitian ini belum melakukan pengujian jangka panjang terhadap ketahanan fisik sensor dalam lingkungan kolam renang yang bersifat korosif akibat kandungan klorin, sehingga daya tahan dan stabilitas kalibrasi sensor pada pemakaian berkelanjutan belum dapat dipastikan. Kelima, sebagaimana dijelaskan penelitian ini tidak menerapkan protokol pengujian repeatability formal, sehingga klaim presisi pengulangan tidak dilaporkan sebagai temuan kuantitatif. Keterbatasan tersebut menjadi dasar bagi rekomendasi pengujian lanjutan dengan durasi lebih panjang, frekuensi pencatatan data yang lebih rapat, variasi kondisi lingkungan, serta evaluasi ketahanan sensor jangka panjang sebelum sistem direkomendasikan untuk penerapan operasional penuh di lapangan.

4. KESIMPULAN

Penelitian mengenai rancang bangun sistem pemantauan pH air dan sirkulasi otomatis berbasis IoT ini telah menghasilkan purwarupa yang mampu memantau parameter pH, TDS, klorin (estimasi ORP), dan alkalinitas secara real-time menggunakan ESP32, serta mengendalikan pompa DC secara otomatis berdasarkan nilai ambang pH. Berdasarkan tiga hari sampel pengujian (hari ke-1, ke-4, dan ke-7) yang dibandingkan dengan alat ukur standar (Tabel 2 dan Tabel 3), sensor pH menunjukkan penyimpangan rata-rata (MAPE) sebesar 0,78% (MAE 0,06), sensor TDS 1,29% (MAE 7 mg/l), estimasi klorin dari ORP 3,07% (MAE 0,03 mg/l), dan alkalinitas 4,23% (MAE 5 mg/l). Sistem kendali pompa juga terbukti merespons kondisi pH di luar ambang batas, sebagaimana ditunjukkan pada hari ke-4 ketika nilai pH mencapai 7,92 dan status pompa berubah menjadi ON. Hasil tersebut menunjukkan bahwa purwarupa yang dikembangkan berfungsi sesuai spesifikasi rancangan pada kondisi pengujian yang dilakukan. Mengingat jumlah titik data yang terbatas ($n = 3$ hari sampel dari 7 hari pengujian) serta belum adanya pengujian pada variasi kondisi lingkungan maupun pengujian jangka panjang (lihat bagian Keterbatasan Penelitian), Angka akurasi tersebut hanya berlaku pada lingkup pengujian yang dilaporkan dan belum dapat digeneralisasi sebagai bukti kesiapan penerapan operasional penuh di lapangan.

Keunggulan sistem ini pada kondisi yang diuji terletak pada kemampuannya untuk melakukan tindakan korektif melalui aktivasi pompa DC segera setelah pH terdeteksi berada di luar ambang batas, sebagaimana didemonstrasikan pada hari ke-4 pengujian. Rekomendasi untuk pengembangan dan pengujian lebih lanjut meliputi perpanjangan durasi pengujian dan pencatatan data yang lebih rapat, pengujian pada variasi kondisi lingkungan dan beban pemakaian kolam, evaluasi ketahanan sensor jangka panjang pada lingkungan yang korosif, integrasi algoritma kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) untuk memprediksi penurunan kualitas air berdasarkan data historis dan pola penggunaan kolam [19], serta penambahan unit pompa dosis (dosing pump) otomatis untuk penambahan bahan kimia cair secara presisi. Apabila keterbatasan tersebut ditindaklanjuti melalui pengujian yang lebih luas dan berjangka panjang, sistem ini berpotensi dikembangkan menjadi unit manajemen air yang lebih otonom untuk mendukung pengelolaan kolam renang yang lebih sehat dan efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian berjudul Sistem Pemantauan dan Kontrol Air Kolam Renang Berbasis Internet of Things. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada institusi, tim penelitian, lab robotika dan jaringan komputer serta pihak yang telah membantu dalam proses perancangan, pengujian, pengumpulan data, hingga penyusunan artikel ini. Dukungan dan kerja sama yang diberikan sangat membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

REFERENCES

- [1] G. Betta, G. Cerro, M. Ferdinandi, L. Ferrigno, and M. Molinara, "Contaminants Detection and Classification Through a Customized IoT-Based Platform: A Case Study," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 22, no. 6, pp. 35–44, 2019, doi: 10.1109/MIM.2019.8917902.



- [2] T. Ahanger, "IoT-Inspired Healthcare-Oriented Water Quality Analysis," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 23, pp. 51056–51063, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3611867.
- [3] S. Ismail, D. W. Dawoud, N. Ismail, R. Marsh, and A. S. Alshami, "IoT-Based Water Management Systems: Survey and Future Research Direction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35942–35952, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3163742.
- [4] M. Kumar, T. Singh, M. K. Maurya, A. Shivhare, A. Raut, and P. K. Singh, "Quality Assessment and Monitoring of River Water Using IoT Infrastructure," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 12, pp. 10280–10290, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3238123.
- [5] A. Alshami, E. Ali, M. Elsayed, A. E. E. Eltoukhy, and T. Zayed, "IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 58427–58453, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392573.
- [6] M. Nugraha, I. Pawana, and G. Pratama, "Sistem Monitoring Kualitas Air pada Akuarium Ikan Mas Koi Menggunakan Panel Surya Berbasis IoT (Internet of Things)," *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, vol. 22, pp. 172–182, 2025, doi: 10.23887/jptk-undiksha.v22i2.96171.
- [7] Y. Wang, I. W.-H. Ho, Y. Chen, Y. Wang, and Y. Lin, "Real-Time Water Quality Monitoring and Estimation in AIoT for Freshwater Biodiversity Conservation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 16, pp. 14366–14374, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3078166.
- [8] Y. Hu and others, "Design of a Terminal Sensor with Super-Resolution Reconstruction Algorithm Used in IoT-Based Water Quality Monitoring," *IEEE Internet Things J.*, vol. 13, no. 7, pp. 13095–13109, 2026, doi: 10.1109/JIOT.2026.3654757.
- [9] M. S. Abdalzaher, M. Krichen, M. F. Shaaban, and M. M. Fouda, "Quality-Focused Internet of Things Data Management: A Survey, Perspectives, Open Issues, and Challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 22, pp. 46431–46458, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3613669.
- [10] L. Manjakkal and others, "Connected Sensors, Innovative Sensor Deployment, and Intelligent Data Analysis for Online Water Quality Monitoring," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 18, pp. 13805–13824, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3081772.
- [11] N. K. Velayudhan, P. Pradeep, S. N. Rao, A. R. Devidas, and M. V Ramesh, "IoT-Enabled Water Distribution Systems—A Comparative Technological Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101042–101070, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208142.
- [12] A. Alshami, E. Ali, M. Elsayed, A. E. E. Eltoukhy, and T. Zayed, "IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 58427–58453, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392573.
- [13] O. Elijah and others, "Effect of Weather Condition on LoRa IoT Communication Technology in a Tropical Region: Malaysia," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 72835–72843, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3080317.
- [14] N. K. Velayudhan, P. Pradeep, S. N. Rao, A. R. Devidas, and M. V Ramesh, "IoT-Enabled Water Distribution Systems—A Comparative Technological Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101042–101070, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208142.
- [15] M. Nugraha, K. Mahabojana, and G. Pratama, "Internet of Things (IoT) Design Based on Smart Farming with Solar Panels in an Agriculture Laboratory," *Matrix: Jurnal Manajemen Teknologi dan Informatika*, vol. 14, 2024, doi: 10.31940/matrix.v14i2.98-106.
- [16] M. A. Rahu, A. F. Chandio, K. Aurangzeb, S. Karim, M. Alhussein, and M. S. Anwar, "Toward Design of Internet of Things and Machine Learning-Enabled Frameworks for Analysis and Prediction of Water Quality," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 101055–101086, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315649.
- [17] M. A. Rahu, A. F. Chandio, K. Aurangzeb, S. Karim, M. Alhussein, and M. S. Anwar, "Toward Design of Internet of Things and Machine Learning-Enabled Frameworks for Analysis and Prediction of Water Quality," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 101055–101086, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315649.
- [18] H. H. Kenchannavar, P. M. Pujar, R. M. Kulkarni, and U. P. Kulkarni, "Evaluation and Analysis of Goodness of Fit for Water Quality Parameters Using Linear Regression Through the Internet-of-Things-Based Water Quality Monitoring System," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 16, pp. 14400–14407, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3094724.