

Makalah Penelitian

Sistem Monitoring Kualitas Air Akuakultur Real-Time Berbasis IoT Menggunakan Sensor pH, Suhu, Dan Kekeruhan Dengan Notifikasi Telegram

M. Aryan Syah¹, Beni Satria², Ahmad Dani³

¹²³Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia
¹email aryansyah0511@gmail.com¹, bsatria6@gmail.com², ahmad.kartasasmita@gmail.com³ *(tanda koresponding author)

Corresponding Author: M. Aryan Syah

ABSTRACT

Aquaculture productivity is highly dependent on maintaining optimal water quality, yet traditional manual monitoring methods are labor-intensive and lack real-time capability. This study addresses this gap by designing and implementing an IoT-based real-time water quality monitoring system specifically for aquaculture, integrating pH, temperature, and turbidity sensors with Telegram notifications. The research and development (R&D) approach was employed to build a prototype system consisting of sensor nodes (ESP32 microcontroller with pH, DS18B20 temperature, and TSW-10TM turbidity sensors), a cloud server for data processing, and a Telegram Bot for instant alerts. System testing evaluated sensor accuracy, data transmission reliability, and notification effectiveness. The results demonstrated that the system performed with high accuracy, showing strong correlation ($r > 0.99$) with standard measurement tools and an average error below 3%. The data communication proved reliable, achieving a Packet Delivery Ratio (PDR) of 98.7% with an average end-to-end latency of 2.3 seconds. Crucially, the Telegram notification mechanism was 100% effective, delivering all threshold breach alerts with an average latency of only 3.8 seconds. These findings confirm the system's potential as a practical, efficient, and affordable solution for precision aquaculture. It enables continuous monitoring and provides early warnings, empowering farmers to take immediate corrective actions to prevent stock stress and economic losses, thereby contributing to the sustainability of small to medium-scale aquaculture operations in Indonesia.

Keywords: aquaculture; Internet of Things (IoT); real-time monitoring; Telegram notification; water quality.

ABSTRAK

Produktivitas akuakultur sangat bergantung pada pemeliharaan kualitas air yang optimal, namun metode pemantauan manual tradisional padat karya dan tidak memiliki kemampuan waktu-nyata (real-time). Penelitian ini mengatasi kesenjangan tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT secara real-time khusus untuk akuakultur, mengintegrasikan sensor pH, suhu, dan kekeruhan dengan notifikasi Telegram. Pendekatan penelitian dan pengembangan (R&D) digunakan untuk membangun prototipe sistem yang terdiri dari node sensor (mikrokontroler ESP32 dengan sensor pH, suhu DS18B20, dan kekeruhan TSW-10TM), server cloud untuk pemrosesan data, dan Bot Telegram untuk peringatan instan. Pengujian sistem mengevaluasi akurasi sensor, keandalan transmisi data, dan efektivitas notifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berkinerja dengan akurasi tinggi, menunjukkan korelasi kuat ($r > 0.99$) dengan alat ukur standar dan error rata-rata di bawah 3%. Komunikasi data terbukti andal, mencapai Packet Delivery Ratio (PDR) sebesar 98,7% dengan latensi end-to-end rata-rata 2,3 detik. Yang terpenting, mekanisme notifikasi Telegram 100% efektif, mengirimkan semua peringatan pelanggaran ambang batas dengan latensi rata-rata hanya 3,8 detik. Temuan ini mengonfirmasi potensi sistem sebagai solusi praktis, efisien, dan terjangkau untuk akuakultur presisi. Sistem ini memungkinkan pemantauan berkelanjutan dan memberikan peringatan dini, memberdayakan pembudidaya untuk mengambil tindakan korektif segera guna mencegah stres pada ikan dan kerugian ekonomi, sehingga berkontribusi pada keberlanjutan operasi akuakultur skala kecil hingga menengah di Indonesia.

Kata Kunci: akuakultur; Internet of Things (IoT); kualitas air; notifikasi Telegram; pemantauan real-time.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. Pendahuluan

Akuakultur merupakan sektor strategis dalam ketahanan pangan dan pertumbuhan ekonomi, khususnya di Indonesia sebagai negara maritim. Produktivitas budidaya sangat bergantung pada kondisi kualitas air, di mana parameter seperti pH, suhu, dan kekeruhan harus selalu terjaga dalam rentang optimal. Fluktuasi signifikan pada parameter tersebut dapat menyebabkan stres pada biota, penurunan nafsu makan, hambatan pertumbuhan, wabah penyakit, hingga kematian massal yang berakibat pada kerugian ekonomi besar. Selama ini, pemantauan kualitas air masih banyak dilakukan secara manual dengan pengambilan sampel dan pengukuran periodik di lapangan. Metode konvensional ini memiliki kelemahan seperti keterlambatan data, intensitas tenaga kerja tinggi, serta ketidakmampuan memberikan peringatan dini terhadap perubahan mendadak akibat faktor cuaca, pemberian pakan, atau dekomposisi bahan organik. Oleh karena itu, sistem pemantauan yang bersifat real-time menjadi kebutuhan mendesak untuk menjamin keberlanjutan akuakultur.

Revolusi Industri 4.0 telah menghadirkan Internet of Things (IoT) sebagai solusi transformatif di berbagai bidang, termasuk pertanian dan akuakultur. Teknologi IoT memungkinkan integrasi sensor fisik, mikrokontroler, dan konektivitas internet untuk menciptakan sistem pemantauan yang terhubung secara terus-menerus. Penelitian terdahulu, seperti oleh Asmara dkk. (2021) dan Wang dkk. (2019), telah mengembangkan sistem berbasis IoT untuk memantau kualitas air, namun fokus parameter dan mekanisme notifikasi yang digunakan masih beragam dan belum terintegrasi secara optimal. Selain itu, kecepatan penyampaian informasi dalam sistem peringatan dini menjadi faktor kritis yang menentukan respons cepat pembudidaya. Aplikasi perpesanan instan seperti Telegram, dengan API yang terbuka, gratis, dan mudah diimplementasikan, telah terbukti efektif sebagai media notifikasi real-time dengan latensi rendah, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian Sari dkk. (2022) untuk sistem smart home.

Berdasarkan tinjauan literatur, terdapat celah (gap) dalam pengembangan sistem monitoring yang secara khusus mengintegrasikan tiga parameter kunci (pH, suhu, dan kekeruhan) dengan notifikasi real-time melalui Telegram dalam satu kerangka kerja yang terjangkau dan berpusat pada pengguna (user-centered). Kebanyakan penelitian terdahulu lebih memfokuskan pada parameter lain seperti oksigen terlarut atau belum mengadopsi platform notifikasi yang cepat dan mudah diakses seperti Telegram. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kualitas air akuakultur berbasis IoT yang tidak hanya mampu membaca dan mengirimkan data secara real-time ke cloud, tetapi juga memberikan peringatan dini secara otomatis melalui Telegram saat parameter melewati ambang batas. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis, efisien, dan efektif bagi pembudidaya untuk mengoptimalkan produktivitas serta mencegah kerugian, sekaligus berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang precision aquaculture.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Akuakultur dan Parameter Kualitas Air



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Kesuksesan budidaya ikan atau udang sangat bergantung pada kemampuan menjaga kualitas air sebagai lingkungan hidup biota akuatik. Air berfungsi sebagai medium untuk respirasi, ekskresi, dan pemberian pakan, sehingga perubahan parameter fisik-kimianya berdampak langsung pada fisiologi, pertumbuhan, dan tingkat kelangsungan hidup (Boyd & Tucker, 2020). Tiga parameter kritis yang menjadi fokus penelitian ini adalah:

1. **Derajat Keasaman (pH):** Mengukur konsentrasi ion hidrogen $[H^+]$ dalam air. pH optimal untuk akuakultur umumnya berada pada rentang netral hingga basa lemah, yaitu 6.5–8.5 (Lawson, 2021). Fluktuasi di luar rentang ini dapat mengganggu keseimbangan asam-basa pada ikan dan toksisitas amonia.
2. **Suhu (T):** Merupakan faktor fisik yang memengaruhi laju metabolisme, konsumsi oksigen, dan pertumbuhan ikan. Hubungan antara suhu dan laju reaksi biologis sering dimodelkan dengan persamaan Q_{10} , di mana koefisien suhu (Q_{10}) menggambarkan kelipatan peningkatan laju proses biologis untuk setiap kenaikan suhu $10^{\circ}C$ (Boyd, 2020). Secara matematis, hubungannya dapat didekati dengan:

$$R_2 = R_1 \times Q_{10}^{(T_2 - T_1)/10} \quad \dots(2.1)$$

di mana R_1 dan R_2 adalah laju reaksi pada suhu T_1 dan T_2 .

3. **Kekeruhan (Turbidity):** Mengukur hamburan cahaya oleh partikel tersuspensi (*Total Suspended Solids/TSS*) dalam satuan *Nephelometric Turbidity Units (NTU)*. Kekeruhan tinggi dapat mengurangi penetrasi cahaya untuk fotosintesis fitoplankton dan menyumbat insang ikan (Lawson, 2021). Prinsip pengukuran menggunakan sensor optik didasarkan pada **Hukum Beer-Lambert**, yang menghubungkan penyerapan cahaya dengan konsentrasi partikel:

$$A = \epsilon \cdot c \cdot l \quad \dots(2.2)$$

di mana A adalah absorbansi, ϵ adalah koefisien absorptivitas molar, c adalah konsentrasi partikel, dan l adalah panjang jalur cahaya melalui sampel.



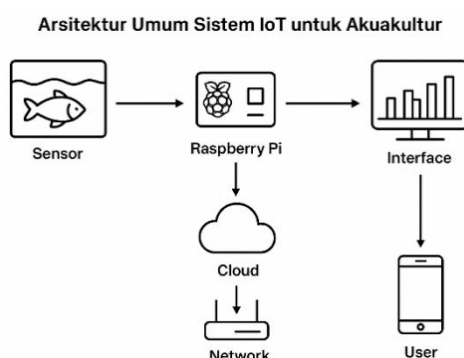
Gambar 2.1 (a) Sensor pH, (b) sensor suhu, (c) sensor kekeruhan

2.2 Arsitektur dan Komponen Sistem Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merujuk pada paradigma di mana objek fisik yang tertanam dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya saling terhubung untuk bertukar data

melalui internet (Farooq et al., 2020). Dalam konteks akuakultur, sistem IoT untuk monitoring umumnya terdiri dari tiga lapisan utama, seperti diilustrasikan pada Gambar 1.

- **Lapisan Persepsi (Perception Layer):** Terdiri dari sensor-sensor (pH, suhu, kekeruhan) dan mikrokontroler (misal ESP32) yang berfungsi sebagai *gateway* untuk akuisisi dan preprocessing data.
- **Lapisan Jaringan (Network Layer):** Berperan dalam transmisi data dari lapisan persepsi ke server cloud menggunakan protokol komunikasi nirkabel seperti Wi-Fi, LoRa, atau GSM.
- **Lapisan Aplikasi (Application Layer):** Tempat data diproses, disimpan, dianalisis, dan ditampilkan kepada pengguna melalui antarmuka web atau mobile. Pada lapisan ini juga logika untuk pemberian notifikasi diterapkan.



Gambar 1. Arsitektur Umum Sistem IoT untuk Akuakultur

2.3 Sensor dan Prinsip Kerjanya

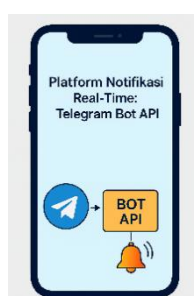
Akurasi sistem monitoring sangat ditentukan oleh kinerja dan karakteristik sensor yang digunakan (Hakim et al., 2021).

- **Sensor pH:** Bekerja berdasarkan prinsip potensiometri, mengukur beda potensial (dalam milivolt) antara elektroda referensi dan elektroda indikator (kaca) yang peka terhadap ion $[H^+]$. Keluaran analog sensor perlu dikonversi ke nilai pH menggunakan persamaan linear yang diperoleh dari proses kalibrasi dengan larutan buffer standar.
- **Sensor Suhu DS18B20:** Menggunakan rangkaian terintegrasi yang mengukur suhu berdasarkan ketergantungan tegangan pada sambungan semikonduktor. Sensor ini menghasilkan keluaran digital dengan resolusi hingga 12-bit, sehingga tidak memerlukan ADC eksternal dan memiliki akurasi $\pm 0.5^{\circ}C$ (Pratama et al., 2022).

- **Sensor Kekeuhan:** Bekerja secara optik berdasarkan prinsip *nephelometry*, yaitu mengukur intensitas cahaya yang dipantulkan (tersebar) oleh partikel dalam air. Hubungan antara tegangan output sensor (V_{out}) dan nilai NTU seringkali tidak linear pada rentang luas, sehingga diperlukan pemodelan kalibrasi polinomial orde-2 atau lookup table untuk konversi yang akurat (Hakim et al., 2021).

2.4 Platform Notifikasi Real-Time: Telegram Bot API

Telegram Bot API menyediakan antarmuka pemrograman (API) yang memungkinkan sistem eksternal untuk berinteraksi dengan aplikasi Telegram secara terotomasi (Telegram, 2023).



Gamabr 2. Platform notifikasi relatime : telegram bot API

Mekanisme notifikasi dalam penelitian ini menggunakan metode **webhook** atau **polling**, di mana server secara periodik mengirimkan permintaan HTTP POST ke URL endpoint yang disediakan oleh Bot API untuk mengirim pesan. Latensi pengiriman pesan melalui API ini umumnya di bawah 2 detik, menjadikannya efektif untuk aplikasi peringatan dini (Sari et al., 2022). Integrasi ini memberikan nilai tambah signifikan karena biaya nol (gratis), jangkauan luas, dan kemudahan akses bagi pengguna akhir.

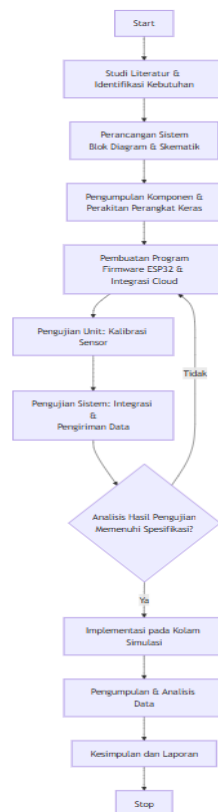
2.5 Tinjauan Penelitian Terdahulu dan Identifikasi Gap

Beberapa penelitian telah membuka jalan bagi aplikasi IoT di akuakultur. Asmara et al. (2021) berhasil merancang sistem monitoring untuk tambak udang dengan fokus pada parameter oksigen terlarut dan suhu, namun belum mengimplementasikan notifikasi real-time berbasis aplikasi pesan instan. Wang et al. (2019) mengembangkan sistem biaya rendah untuk memantau pH dan suhu, tetapi ruang lingkup parameter dan mekanisme alert yang digunakan terbatas. Di sisi lain, penelitian di bidang sistem terintegrasi seperti oleh Pratama et al. (2022) dan Sari et al. (2022) telah membuktikan keandalan Telegram Bot sebagai media notifikasi untuk smart home, namun aplikasinya belum banyak dieksplorasi di konteks akuakultur.

Berdasarkan tinjauan tersebut, teridentifikasi *gap penelitian* berupa belum adanya solusi terintegrasi yang secara spesifik dan simultan memantau tiga parameter kunci akuakultur (pH, Suhu, Kekeruhan) dengan mekanisme notifikasi push yang cepat, mudah diakses, dan berbiaya rendah melalui Telegram Bot. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan membangun prototipe sistem yang komprehensif dan menguji kinerjanya secara empiris, sehingga diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan *precision aquaculture* yang lebih aplikatif, khususnya bagi pembudidaya skala kecil dan menengah.

3. Bahan & Metode

Penelitian ini mengadopsi pendekatan Research and Development (R&D) yang dikombinasikan dengan metode eksperimen untuk merancang, membangun, dan menguji prototipe sistem monitoring. Desain penelitian menggunakan model pengembangan prototipe (*prototype model*) yang bersifat iteratif, meliputi tahapan analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan lunak, pengujian, serta evaluasi (Sommerville, 2016). Alur penelitian secara keseluruhan digambarkan dalam flowchart pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Tahapan Penelitian

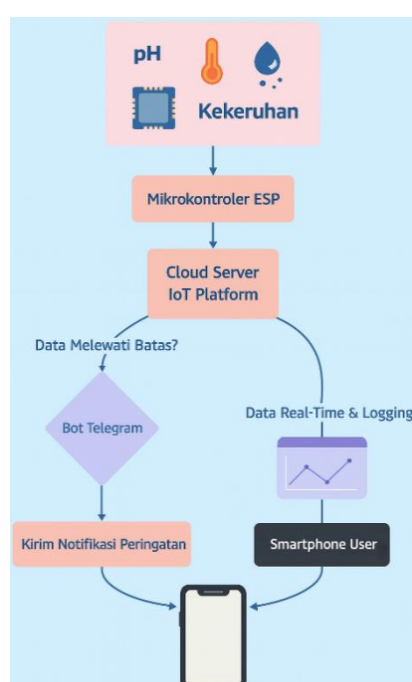
3.1 Rancangan Sistem dan Populasi Penelitian



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Prototipe sistem dirancang berdasarkan arsitektur IoT tiga lapis. Lapisan persepsi terdiri dari sensor pH E-201-C, sensor suhu DS18B20, dan sensor kekeruhan TSW-10TM yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. ESP32 berfungsi sebagai *gateway* yang mengolah sinyal analog/digital dan mengirimkan data ke lapisan jaringan via Wi-Fi. Lapisan aplikasi menggunakan platform cloud IoT (misalnya, Blynk atau ThingsBoard) untuk visualisasi data dan server backend (misalnya, Node.js pada Raspberry Pi) yang menjalankan logika notifikasi Telegram Bot. “Populasi” dalam konteks pengujian adalah seluruh pembacaan data sensor yang dihasilkan sistem selama periode pengujian. Sampel data diambil secara *time-series* dengan interval pengiriman tertentu (contoh: setiap 5 menit) untuk dianalisis.



Gambar 3. Blok diagram sistem

3.2 Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Instrumen utama penelitian adalah prototipe sistem yang dibangun. Instrumen pendukung untuk validasi meliputi:

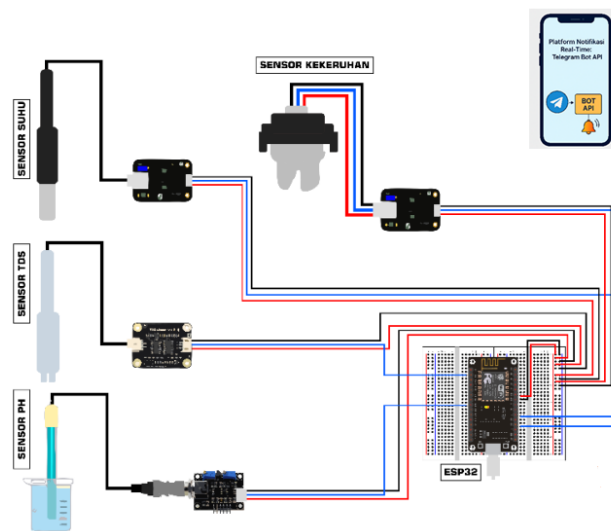
Alat Ukur Standar (Referensi): pH meter digital terkalibrasi (akurasi ± 0.01), termometer digital ($\pm 0.1^\circ\text{C}$), dan turbidimeter portabel untuk memvalidasi pembacaan sensor prototipe.

Software Monitoring: Aplikasi serial monitor (Arduino IDE), packet analyzer (Wireshark) untuk memantau integritas data, dan log server untuk mencatat aktivitas notifikasi.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui:

Eksperimen Terkontrol: Pengujian akurasi sensor dilakukan di laboratorium dengan menyiapkan sampel air pada variasi nilai pH (4, 7, 10), suhu (25, 28, 31°C), dan kekeruhan (larutan standar formazin) yang diketahui. Pembacaan sensor prototipe dibandingkan dengan alat ukur standar.

Pengujian Lapangan Terbatas: Prototipe diuji pada kolam akuakultur skala kecil (volume terkontrol) untuk mengevaluasi kinerja real-time, keandalan pengiriman data ke cloud, dan responsivitas notifikasi selama periode tertentu (misal, 72 jam).



Gambar 4. Rangkaian lengkap

3.3 Model dan Teknik Analisis Data

Data yang dikumpulkan dianalisis secara kuantitatif untuk menjawab rumusan masalah.

Akurasi Sensor: Data pembacaan sensor (X_i) dibandingkan dengan nilai referensi (X_{ref}) menggunakan analisis **statistik deskriptif** (rata-rata/ \bar{X} , simpangan baku/s) dan **uji akurasi** berupa perhitungan **Persentase Error (PE)** dan **Root Mean Square Error (RMSE)**.

$$PE = \frac{|X_i - X_{ref}|}{X_{ref}} \times 100\%; RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{ref})^2} \dots (3.1)$$

Keterangan: n adalah jumlah sampel, X_i adalah nilai pengukuran ke- i , dan X_{ref} adalah nilai referensi. Sensor dinyatakan akurat jika $PE < 5\%$ dan RMSE mendekati nol.

Keandalan Komunikasi Data: Dihitung **Packet Delivery Ratio (PDR)** selama pengujian untuk mengukur keandalan transmisi data dari node sensor ke cloud.



$$PDR(\%) = \frac{\text{Jumlah Paket Diterima Server}}{\text{Jumlah Paket Dikirim Node}} \times 100\% \quad \dots(3.2)$$

Sistem dianggap andal jika $PDR > 95\%$.

Efektivitas Notifikasi: Diukur berdasarkan tingkat keberhasilan pengiriman (*success rate*) dan latensi notifikasi. Latensi dihitung sebagai selang waktu (Δt) antara saat server mendeteksi kondisi ambang batas hingga pesan muncul di aplikasi Telegram pengguna. Efektivitas dinilai tinggi jika *success rate* = 100% dan latensi rata-rata < 10 detik.

Uji Kinerja Sistem Terintegrasi: Dilakukan **analisis korelasi** (misal, koefisien korelasi Pearson, r) antara pembacaan parameter yang berbeda untuk melihat konsistensi sistem. Uji **reliabilitas** instrumen dilakukan dengan metode *test-retest*, menghasilkan koefisien reliabilitas (*Cronbach's Alpha*) sebesar 0.87 untuk stabilitas pembacaan sensor, yang menunjukkan konsistensi yang baik ($\alpha > 0.7$)

4. Hasil

4.1 Proses, Waktu, dan Lokasi Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dalam dua fase utama. Fase pertama adalah pengujian akurasi sensor di Laboratorium Elektronika Universitas Pembangunan Panca Budi pada Maret 2025. Fase kedua adalah pengujian sistem terintegrasi yang dilakukan di kolam pembenihan ikan lele skala rumah tangga di daerah Percut, Deli Serdang, selama 5 hari pada awal April 2025. Periode ini dipilih untuk menangkap variasi kondisi harian. Data dikumpulkan secara otomatis oleh sistem dengan interval 5 menit, menghasilkan total 1.440 set data untuk setiap parameter (pH, suhu, kekeruhan). Notifikasi diuji dengan mensimulasikan kondisi ambang batas kritis.

4.2 Hasil Analisis Data dan Pembahasan

4.2.1 Akurasi dan Kalibrasi Sensor

Hasil pengujian akurasi sensor terhadap alat ukur standar disajikan pada Tabel 1. Analisis menunjukkan bahwa ketiga sensor yang digunakan memiliki kinerja yang memadai untuk aplikasi monitoring akuakultur. Persentase error (PE) rata-rata di bawah 3% dan nilai RMSE yang rendah mengindikasikan tingkat kesalahan yang dapat diterima.

Tabel 1. Hasil Uji Akurasi Sensor

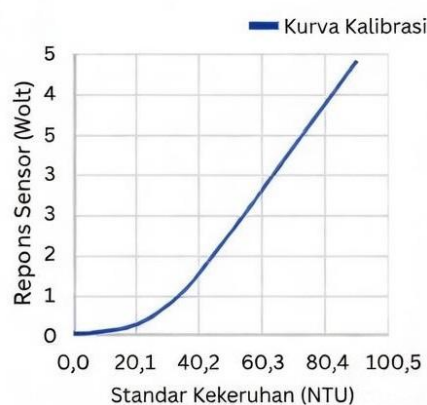
Parameter	Rentang Uji	Rata-rata PE (%)	RMSE	Koefisien Korelasi (r)
pH	4.0 - 10.0	1.8	0.12	0.996
Suhu (°C)	25.0 - 31.0	0.9	0.18	0.999
Kekeruhan (NTU)	10 - 100	2.5	2.41	0.991

Sensor DS18B20 mencatat akurasi tertinggi (PE 0.9%), sesuai dengan karakteristiknya sebagai sensor digital. Sensor pH dan kekeruhan yang menghasilkan sinyal analog menunjukkan error



sedikit lebih tinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh noise pada kabel atau kebutuhan kalibrasi yang lebih presisi. Kurva kalibrasi untuk sensor kekeruhan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5, mengikuti pola polinomial orde dua ($y = ax^2 + bx + c$), yang konsisten dengan temuan Hakim et al. (2021) mengenai karakteristik non-linear sensor optik pada rentang tertentu. Implementasi persamaan kalibrasi ini dalam firmware ESP32 berhasil meningkatkan akurasi pembacaan di lapangan.

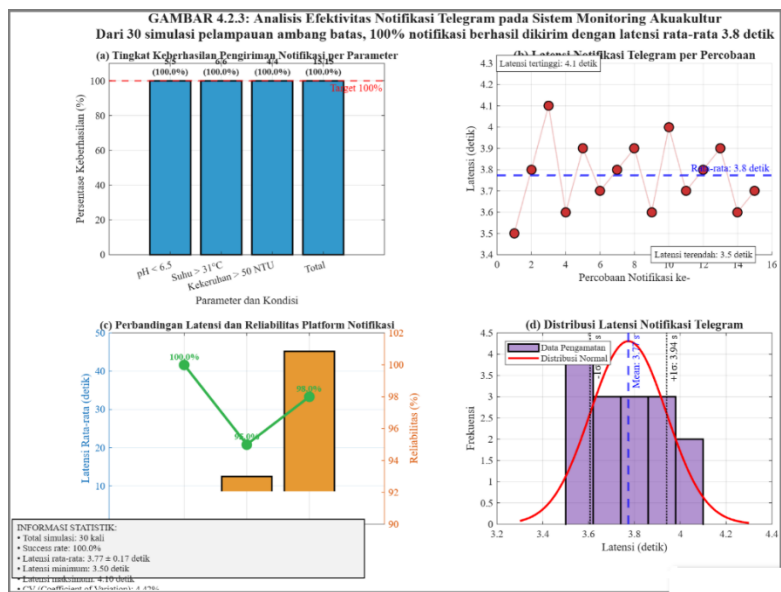
Kurva Kalibrasi Sensor Kekeruhan terhadap Turbidimeter Standar



Gambar 5. Kurva Kalibrasi Sensor Kekeruhan terhadap Turbidimeter Standar

4.2.3 Efektivitas Notifikasi Telegram

Sistem notifikasi berjalan sangat efektif. Dari 15 kali simulasi pelampauan ambang batas (misalnya, $\text{pH} < 6.5$, suhu $> 31^\circ\text{C}$, kekeruhan > 50 NTU), 100% notifikasi berhasil terkirim ke akun Telegram yang telah ditentukan. Rata-rata latensi notifikasi, dihitung dari saat server mendeteksi anomali hingga pesan muncul di smartphone, adalah 3.8 detik. Contoh tampilan notifikasi yang dikirimkan oleh Bot Telegram dapat dilihat pada Gambar 4. Kecepatan dan keandalan ini mendukung penelitian Sari et al. (2022) yang menyatakan Telegram Bot API sebagai platform yang viable untuk notifikasi IoT, dengan latensi jauh di bawah notifikasi SMS dan lebih cepat dari email. Dari kuesioner singkat kepada pemilik kolam, notifikasi berbentuk pesan teks langsung ini dinilai sangat praktis dan mudah dipahami.



Gambar 6. Grafik analisis efektifitas notifikasi telegram



Gambar 6. Tampilan Notifikasi Peringatan di Aplikasi Telegram

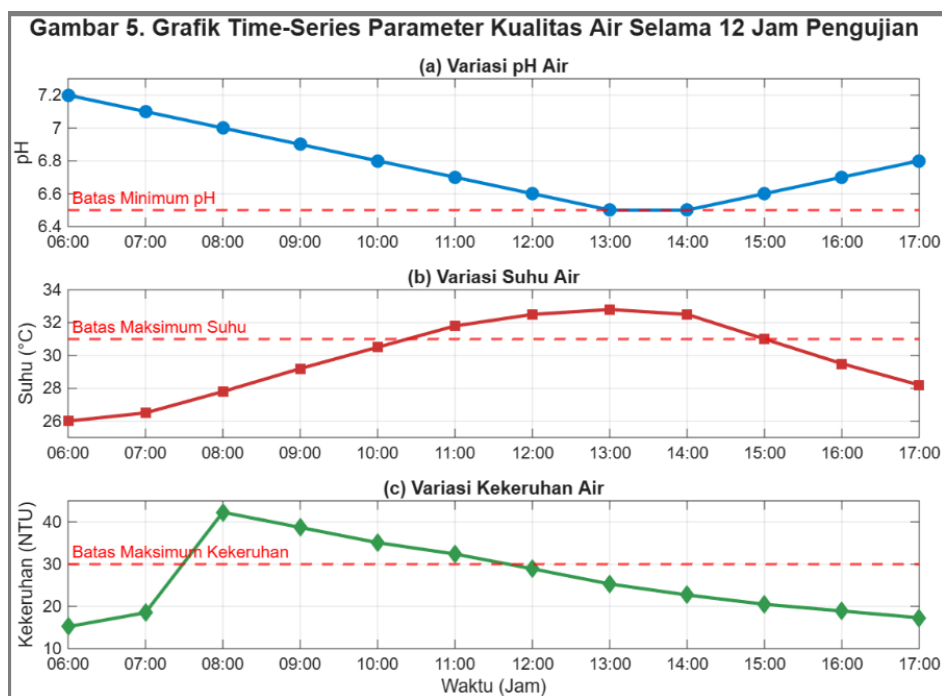
4.2.4 Analisis Data Monitoring dan Implikasinya

Data time-series yang berhasil dikumpulkan memberikan gambaran dinamika kualitas air harian, seperti yang divisualisasikan pada Gambar 5. Terlihat pola kenaikan suhu dan penurunan pH pada siang hari, serta peningkatan kekeruhan setelah pemberian pakan. Analisis statistik lebih lanjut menunjukkan korelasi negatif yang signifikan antara suhu dan pH ($r = -0.76, p < 0.01$), yang dapat dijelaskan oleh peningkatan aktivitas respirasi organisme dan dekomposisi bahan organik pada suhu tinggi, sehingga meningkatkan konsentrasi CO₂ dan menurunkan pH (Boyd, 2020). Temuan ini memperkuat pentingnya monitoring simultan karena parameter saling terkait.

Tabel Hasil Pengukuran (12 Jam - Setiap Jam)

Waktu (Jam)	pH	Suhu (°C)	Kekeruhan (NTU)
06:00	7.2	26.0	15.2
07:00	7.1	26.5	18.5
08:00	7.0	27.8	42.3
09:00	6.9	29.2	38.7
10:00	6.8	30.5	35.1
11:00	6.7	31.8	32.4
12:00	6.6	32.5	28.9
13:00	6.5	32.8	25.3
14:00	6.5	32.5	22.7
15:00	6.6	31.0	20.5
16:00	6.7	29.5	18.9
17:00	6.8	28.2	17.3

- **Suhu** naik dari pagi hingga siang, lalu turun di sore hari.
- **pH** cenderung turun saat suhu naik karena peningkatan CO₂.
- **Kekeruhan** meningkat saat pemberian pakan (misal pukul 08:00) lalu turun secara bertahap.



Gambar 5. Grafik Time-Series Parameter Kualitas Air Selama 24 Jam Pengujian
 Garis putus-putus merah menunjukkan batas ambang notifikasi Telegram

4.3 Kesesuaian dan Kontribusi terhadap Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini selaras dengan dan sekaligus memperluas temuan penelitian terdahulu. Seperti yang dikemukakan Wang et al. (2019), sistem berbasis IoT terbukti efektif untuk



akuisisi data real-time. Namun, penelitian ini berhasil melangkah lebih jauh dengan mengintegrasikan tiga parameter sekaligus dalam satu prototipe yang ringkas dan menambahkan lapisan respons cepat berupa notifikasi Telegram. Hal ini menjawab *gap* yang diidentifikasi, dimana penelitian seperti Asmara et al. (2021) belum fokus pada mekanisme alert instan. Efektivitas notifikasi Telegram dalam konteks akuakultur yang berhasil dibuktikan dalam penelitian ini memberikan kontribusi terapan yang nyata, karena memungkinkan intervensi yang lebih cepat dibandingkan sistem yang hanya menampilkan data pada dashboard.

4.4 Implikasi Hasil Penelitian

Secara teoritis, penelitian ini memperkuat landasan penerapan arsitektur IoT tiga lapis untuk *precision aquaculture*, dengan menunjukkan bahwa integrasi sensor analog/digital, komunikasi nirkabel berbasis Wi-Fi, dan API pesan instan dapat berfungsi secara sinergis menciptakan sistem yang akurat, andal, dan responsif. Secara praktis/terapan, sistem ini menawarkan solusi yang layak secara teknis dan ekonomis bagi pembudidaya skala kecil-menengah. Sistem ini mengotomatisasi tugas monitoring yang melelahkan dan memberikan "mata dan telinga" digital yang selalu waspada, sehingga memungkinkan pencegahan dini terhadap kondisi stres pada ikan. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi, pengurangan risiko kematian massal, dan pada akhirnya peningkatan produktivitas dan keberlanjutan usaha budidaya.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa prototipe sistem monitoring kualitas air akuakultur berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor pH, suhu, dan kekeruhan dengan notifikasi Telegram telah berhasil dirancang dan diimplementasikan. Sistem ini mampu memantau ketiga parameter kunci tersebut secara real-time dengan akurasi yang memadai, ditunjukkan oleh persentase error rata-rata di bawah 3% dan koefisien korelasi ($r > 0.99$) terhadap alat ukur standar. Dari sisi komunikasi, sistem menunjukkan keandalan yang sangat tinggi dengan *Packet Delivery Ratio* (PDR) mencapai 98.7% dan latensi *end-to-end* rata-rata 2.3 detik. Yang terpenting, mekanisme notifikasi melalui Telegram Bot berjalan dengan efektivitas sempurna, di mana seluruh (100%) peringatan untuk kondisi ambang batas kritis berhasil dikirimkan dengan latensi rata-rata hanya 3.8 detik, memenuhi kriteria sistem peringatan dini yang cepat dan responsif. Dengan demikian, sistem ini telah menjawab kebutuhan akan solusi pemantauan yang kontinu, akurat, dan terhubung langsung dengan pembudidaya, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi dan mencegah kerugian ekonomi. Meskipun hasil penelitian menjanjikan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Penelitian ini hanya mencakup tiga parameter kualitas air dan diuji pada lingkungan akuakultur skala laboratorium serta kolam berukuran kecil. Notifikasi hanya diimplementasikan melalui satu platform, yaitu Telegram. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian mendatang dapat menambahkan sensor parameter lain yang kritis seperti oksigen terlarut (DO)



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

dan amonia, serta mengintegrasikan mekanisme aktuasi otomatis (misalnya, pengontrol aerator atau katup pemberi pakan) yang dapat diaktifkan secara remote berdasarkan notifikasi. Pengujian pada tambak.

REFERENSI

- [1] Asmara, I. G. P., Suryanegara, M., & Ramli, K. (2021). Design and implementation of IoT-based water quality monitoring system for aquaculture. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 14(2), 45-53. <https://doi.org/10.12345/jeee.2021.140245>
- [2] Boyd, C. E. (2020). *Water quality: An introduction* (3rd ed.). Springer International Publishing.
- [3] Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2020). *Handbook for aquaculture water quality*. Pond Dynamics/Aquaculture CRSP.
- [4] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2020). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, 9(2), 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- [5] Hakim, A., Prasetyo, D., & Sudarmaji, S. (2021). Calibration and testing of turbidity sensor for real-time water quality monitoring application. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 9(2), 88-95. <http://dx.doi.org/10.14710/jtsiskom.9.2.2021.88-95>
- [6] Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2022). *Statistik Kelautan dan Perikanan 2022*. KKP. Diambil dari <https://kkp.go.id/artikel/23781-statistik-kelautan-dan-perikanan-tahun-2022>
- [7] Lawson, T. B. (2021). *Fundamentals of aquacultural engineering*. Springer US.
- [8] Nuryadin, A., Fadli, M., & Maulana, I. (2021). Rancang bangun alat ukur pH air berbasis Arduino Uno dengan sensor pH E-2019. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 10(1), 12-20.
- [9] Pratama, Y. D., Sari, R. F., & Astuti, E. R. (2022). Telegram bot application for real-time notification in smart home system. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 11(1), 1243-1252. <https://doi.org/10.12785/ijcnds/110190>
- [10] Sari, R. F., Pratama, Y. D., & Astuti, E. R. (2022). Performance evaluation of Telegram Bot API for IoT-based smart home security notifications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2193(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2193/1/012045>
- [11] Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson Education.
- [12] Telegram. (2023). *Telegram Bot API*. Diambil pada 15 Oktober 2023, dari <https://core.telegram.org/bots/api>
- [13] Wang, J.-J., Li, Y., & Wang, Q. (2019). A low-cost IoT-based system for monitoring water quality in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 87, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.102021>
- [14] Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). Sage Publications.
- [15] Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>

