

Perancangan dan Implementasi Sistem Aquaponik Cerdas Berbasis IoT untuk Efisiensi Air dan Nutrisi

Stephano Caesar Wenston Ngangi¹, Edwin Tenda², Lilis Dwi Sapta Aprilyani³, Eric Alfonsius^{4*}

^{1,2,4}Sistem Informasi, Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

³Matematika, Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

¹stephano.ngangi@unsrat.ac.id, ²tenda.edwin@unsrat.ac.id, ³lilisdwisapta@unsrat.ac.id,

⁴ericalfonsius@unsrat.ac.id

Abstrak

Kata Kunci:

Aquaponik cerdas;
Internet of Things;
Efisiensi Air;
NodeMCU ESP32;
sistem kendali;

Keterbatasan sumber daya air serta masih banyaknya sistem aquaponik yang dikelola secara manual menyebabkan penggunaan air dan nutrisi belum optimal serta berpotensi menimbulkan pemborosan dan keterlambatan respon terhadap perubahan kondisi lingkungan. Permasalahan ini menunjukkan perlunya penerapan teknologi otomatisasi yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem Aquaponik Cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu mengoptimalkan penggunaan air dan nutrisi pada sistem budidaya terpadu antara ikan dan tanaman. Metode penelitian menggunakan pendekatan System Development Life Cycle (SDLC) dengan model Waterfall, yang mencakup tahapan analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian fungsional. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP32 yang terhubung dengan sensor suhu dan kelembapan DHT22 serta modul RTC untuk pengaturan waktu penyiraman otomatis. Data dikirim ke dashboard web dan notifikasi WhatsApp untuk memantau kondisi lingkungan secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengatur sirkulasi air secara otomatis dengan akurasi waktu ± 2 detik dan menurunkan konsumsi air hingga 38% dibandingkan metode manual. Sistem juga memberikan informasi status pompa dan kondisi lingkungan secara cepat melalui jaringan WiFi. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem Aquaponik Cerdas yang dikembangkan berfungsi dengan baik sesuai tujuan, meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi, serta memiliki potensi untuk diterapkan pada skala kecil maupun komersial dengan pengembangan lanjutan terhadap parameter kualitas air.

Abstract

Keywords:

Smart aquaponic;
Internet of Things;
Water Efficiency;
NodeMCU ESP32;
Control System;

Limited water resources and the continued reliance on manual aquaponic management systems have resulted in suboptimal use of water and nutrients, potentially leading to resource waste and delayed responses to environmental changes. This issue highlights the need for automation technology capable of real-time monitoring and control. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based Smart Aquaponics system to optimize water and nutrient usage in an integrated fish and plant cultivation system. The research method applies the System Development Life Cycle (SDLC) approach using the Waterfall model, which includes requirements analysis, system design, hardware and software implementation, and functional testing. The system is developed using a NodeMCU ESP32 microcontroller connected

Eric Alfonsius: *Penulis Korespondensi



Copyright © 2025, Stephano Caesar Wenston Ngangi, Edwin Tenda, Lilis Dwi Sapta Aprilyani, Eric Alfonsius.

to a DHT22 temperature and humidity sensor and an RTC module for automated irrigation scheduling. Data are transmitted to a web-based dashboard and WhatsApp notifications to enable real-time environmental monitoring. Testing results indicate that the system can automatically regulate water circulation with a timing accuracy of ± 2 seconds and reduce water consumption by up to 38% compared to manual methods. The system also provides rapid updates on pump status and environmental conditions via WiFi connectivity. The study concludes that the developed Smart Aquaponics system functions effectively according to its objectives, improves water and nutrient efficiency, and has strong potential for application in small-scale and commercial settings, with further development recommended for additional water quality parameters.

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global dan pertumbuhan populasi yang terus meningkat telah mendorong peningkatan kebutuhan pangan yang berkelanjutan, sekaligus menuntut efisiensi dalam penggunaan sumber daya air [1]. Sektor pertanian dan perikanan menjadi salah satu bidang yang terdampak langsung oleh keterbatasan air dan ketidakstabilan lingkungan [2]. Oleh karena itu, diperlukan inovasi teknologi yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga efisiensi penggunaan sumber daya [3], [4]. Salah satu solusi yang berkembang adalah sistem aquaponik, yaitu integrasi antara budidaya ikan (akuakultur) dan budidaya tanaman tanpa tanah (hidroponik) dalam satu sistem sirkulasi tertutup [5], [6]. Sistem ini memanfaatkan limbah metabolik ikan sebagai nutrisi bagi tanaman, sementara tanaman berfungsi sebagai biofilter alami yang membantu menjaga kualitas air sebelum dikembalikan ke kolam.

Meskipun konsep aquaponik menawarkan efisiensi air dan keberlanjutan lingkungan, implementasinya di lapangan masih banyak dilakukan secara manual [7], [8]. Pengguna umumnya mengandalkan pengamatan langsung untuk mengontrol sirkulasi air, suhu lingkungan, dan kondisi pertumbuhan tanaman. Pendekatan ini berpotensi menimbulkan ketidaktepatan dalam pengambilan keputusan, keterlambatan respon terhadap perubahan kondisi lingkungan, serta pemborosan air akibat pengoperasian pompa yang tidak terkontrol secara optimal. Selain itu, kurangnya sistem pemantauan real time menyulitkan pengguna dalam melakukan pengawasan jarak jauh, terutama pada skala operasional yang lebih besar.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk menghadirkan sistem kendali otomatis berbasis sensor yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian secara real time [9]. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring suhu, pH, atau kendali pompa berbasis mikrokontroler dan platform daring [10]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada fungsi pemantauan (monitoring) tanpa menekankan pada integrasi sistem secara menyeluruh, pengujian stabilitas operasional dalam jangka waktu tertentu, serta evaluasi efisiensi penggunaan air secara kuantitatif [11], [12], [13]. Selain itu, belum semua sistem dilengkapi dengan mekanisme notifikasi instan yang dapat memberikan peringatan otomatis ketika terjadi kondisi abnormal.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi prototipe sistem aquaponik cerdas berbasis IoT yang tidak hanya melakukan pemantauan, tetapi juga pengendalian otomatis sirkulasi air berdasarkan parameter suhu dan kelembapan lingkungan. Sistem dikembangkan menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor DHT22 sebagai pendeteksi kondisi lingkungan, serta modul RTC untuk pengaturan jadwal operasi pompa. Data dikirim secara berkala melalui koneksi WiFi ke server dan ditampilkan pada dashboard web interaktif, serta dilengkapi dengan notifikasi otomatis melalui WhatsApp ketika parameter melewati batas yang telah ditentukan.

Melalui pengembangan dan pengujian prototipe ini, penelitian bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem aquaponik cerdas berbasis IoT yang terintegrasi antara sensor, mikrokontroler, server, dan sistem notifikasi, tujuan lainnya mengevaluasi kinerja integrasi sistem

berdasarkan stabilitas pengiriman data, waktu respon, dan keandalan operasional selama pengujian nonstop, serta menganalisis tingkat efisiensi penggunaan air yang dihasilkan dibandingkan metode manual. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan model sistem aquaponik yang efisien, responsif, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan, sekaligus menjadi fondasi pengembangan teknologi pertanian modern berbasis IoT yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.METODE PENELITIAN

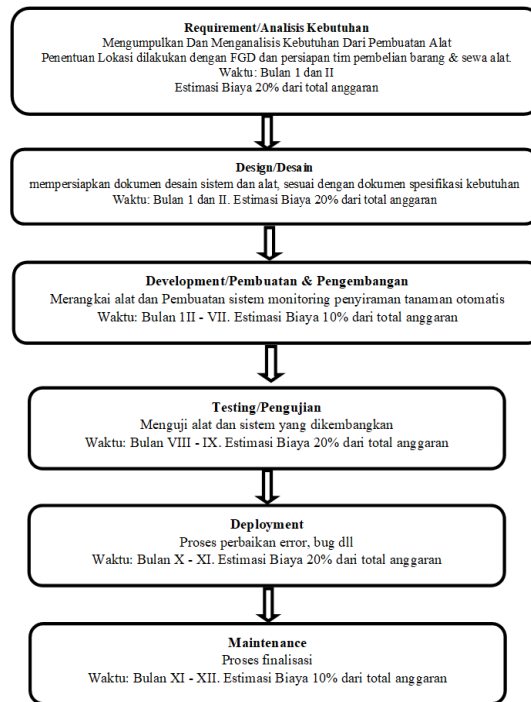
Dalam penelitian ini, metode yang digunakan disusun secara sistematis untuk mencapai tujuan perancangan dan implementasi **sistem aquaponik cerdas berbasis Internet of Things (IoT)** yang efisien dalam penggunaan air dan nutrisi. Metode penelitian dirancang agar mampu menggambarkan tahapan pengembangan sistem mulai dari analisis kebutuhan hingga tahap penerapan prototipe. Pendekatan yang digunakan bersifat rekayasa sistem (engineering approach) dengan model Software Development Life Cycle (SDLC) tipe *Waterfall* [14], [15], sehingga setiap tahap dapat dilaksanakan secara berurutan dan terukur. Metode ini dipilih karena sesuai untuk pengembangan sistem berbasis perangkat keras dan perangkat lunak yang memerlukan proses pengujian bertahap. Selain itu, metode ini memungkinkan integrasi antara pengujian teknis perangkat IoT dan evaluasi efisiensi sistem terhadap penggunaan air. Secara umum, metode penelitian ini mencakup analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, pengujian, serta penerapan awal (deployment) prototipe.

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (engineering approach) yang berfokus pada perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kendali otomatis berbasis Internet of Things (IoT) [16], [17], [18]. Tujuan utama pendekatan ini adalah menghasilkan prototipe sistem aquaponik cerdas yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi melalui pengumpulan data sensor dan pengendalian otomatis. Penelitian ini bersifat eksperimental, di mana hasil implementasi diuji berdasarkan parameter performa sistem seperti akurasi kendali waktu, stabilitas pengairan, serta efisiensi air yang dihasilkan dibandingkan metode manual.

2.2 Metode Pengembangan Sistem

Pengembangan sistem dilakukan dengan menggunakan **metode Software Development Life Cycle (SDLC) model Waterfall**, karena metode ini memberikan alur kerja yang sistematis dan terstruktur dalam pengembangan perangkat lunak dan perangkat keras seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 SDLC Model Waterfall

Tahapan yang dilakukan meliputi:

1. **Analisis Kebutuhan (Requirement Analysis)**

Pada tahap ini dilakukan identifikasi kebutuhan sistem, termasuk kebutuhan perangkat keras seperti **NodeMCU ESP32**, sensor **DHT22**, modul **RTC (Real-Time Clock)**, dan **relay pompa air**, serta kebutuhan perangkat lunak berupa **dashboard web**, **database MySQL**, dan **integrasi API WhatsApp** untuk notifikasi. Kebutuhan pengguna juga dianalisis untuk menentukan antarmuka dan fungsi utama sistem.

2. **Perancangan Sistem (System Design)**

Tahap ini meliputi pembuatan **diagram alir sistem (flowchart)**, **diagram blok perangkat keras**, serta **perancangan antarmuka web**. Arsitektur sistem dirancang agar semua data sensor dikirim ke server melalui koneksi WiFi dan ditampilkan dalam bentuk grafik serta log data pada dashboard. Sistem kendali diatur berdasarkan logika waktu yang disimpan pada RTC dan kondisi lingkungan dari sensor.

3. **Implementasi (Implementation)**

Implementasi dilakukan dengan menghubungkan komponen perangkat keras, menulis program mikrokontroler menggunakan **Arduino IDE**, dan mengembangkan dashboard berbasis **HTML**, **PHP**, dan **Chart.js**. Komunikasi antara perangkat IoT dan server menggunakan protokol **HTTP**. Sistem dirancang untuk mengirim data sensor setiap 10 detik dan mengaktifkan pompa air secara otomatis sesuai jadwal yang ditentukan.

4. **Pengujian (Testing)**

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem berfungsi sesuai rancangan. Tahapan ini mencakup pengujian **sensor DHT22**, **akurasi waktu RTC**, **respon sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan**, dan **validasi data pada dashboard**. Uji efisiensi air dilakukan dengan membandingkan volume air yang digunakan pada sistem otomatis dan sistem manual selama periode waktu tertentu.

5. **Penerapan (Deployment)**

Tahap ini merupakan proses pemasangan dan evaluasi awal dari prototipe sistem aquaponik cerdas. Untuk tahun 2025, implementasi difokuskan pada **pembuatan dan pengujian prototipe**

di laboratorium, sedangkan pada tahun 2026 direncanakan **penerapan di kolam ikan skala kecil** untuk uji kinerja lingkungan nyata dan adaptabilitas sistem terhadap kondisi lapangan.

2.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium dan lahan pekarangan rumah salah satu penulis. Waktu penelitian berlangsung selama Agustus hingga Desember 2025, meliputi tahapan perancangan, implementasi, pengujian, dan dokumentasi hasil sistem prototipe.

2.4 Alat dan Bahan Penelitian

1. Perangkat keras (hardware):
 - NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama
 - Sensor DHT22 (suhu dan kelembapan)
 - Modul RTC DS3231
 - Pompa air mini DC 12V
 - Relay 1-channel
 - Breadboard dan kabel jumper
2. Perangkat lunak (software):
 - Arduino IDE
 - MySQL dan PHP
 - HTML, CSS, Chart.js untuk dashboard
 - API WhatsApp (notifikasi otomatis)

2.5 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data diperoleh dari hasil pembacaan sensor suhu dan kelembapan setiap interval tertentu. Data dikirim ke server untuk disimpan dalam basis data dan ditampilkan secara visual. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap standar alat ukur referensi, serta menghitung tingkat efisiensi penggunaan air menggunakan rumus:

$$Efisiensi = \frac{V_{manual} - V_{otomatis}}{V_{manual}} \times 100\%$$

Hasil uji kemudian dianalisis secara **deskriptif kuantitatif** untuk menilai kinerja sistem berdasarkan kecepatan respon, akurasi kendali waktu, dan penghematan air.

2.6 Metode Pengujian Sistem

Metode pengujian dalam penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem aquaponik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan berfungsi sesuai dengan spesifikasi perancangan serta mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dibandingkan metode manual. Pengujian dilakukan secara bertahap meliputi pengujian perangkat keras (hardware testing), perangkat lunak (software testing), pengujian integrasi sistem (integration testing), serta pengujian kinerja (performance testing).

2.6.1 Pengujian Perangkat Keras (Hardware Testing)

Pengujian perangkat keras dilakukan untuk memastikan setiap komponen berfungsi dengan baik sebelum diintegrasikan ke dalam sistem. Tahapan pengujian meliputi:

1. Pengujian Sensor DHT22
 - Membandingkan hasil pembacaan suhu dan kelembapan dengan alat ukur referensi (termometer dan hygrometer digital).
 - Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali dalam interval waktu tertentu.
 - Menghitung nilai error menggunakan rumus:

$$Error(\%) = \frac{|X_{sensor} - X_{referensi}|}{X_{referensi}} \times 100\%$$

- Menghitung rata-rata error untuk menentukan tingkat akurasi sensor.
- 2. Pengujian Modul RTC DS3231
 - Membandingkan waktu RTC dengan waktu standar (WIB).
 - Mengamati selisih waktu selama periode 24 jam.
 - Menghitung deviasi waktu (dalam detik).
- 3. Pengujian Relay dan Pompa Air
 - Menguji respon relay terhadap perintah ON/OFF dari NodeMCU ESP32.
 - Mengukur waktu respon (delay) antara perintah dan aktivasi pompa menggunakan stopwatch.
 - Mengamati kestabilan pompa selama periode operasi tertentu.

2.6.2 Pengujian Perangkat Lunak (Software Testing)

Pengujian perangkat lunak dilakukan menggunakan metode Black Box Testing, yaitu pengujian berdasarkan fungsi sistem tanpa melihat kode program secara langsung. Parameter yang diuji meliputi:

Tabel 2.1 Skenario Uji Blackbox Testing

No	Fitur yang Diuji	Skenario Uji	Hasil yang Diharapkan
1	Pengiriman Data Sensor	Sensor aktif dan terhubung WiFi	Data tampil di dashboard
2	Penyimpanan Database	Data dikirim tiap 10 detik	Data tersimpan di MySQL
3	Notifikasi WhatsApp	Kondisi suhu melewati batas	Pesan notifikasi terkirim
4	Kontrol Pompa Otomatis	Waktu sesuai jadwal RTC	Pompa aktif otomatis

Hasil pengujian dinyatakan valid apabila output sistem sesuai dengan hasil yang diharapkan.

2.6.3 Pengujian Integrasi Sistem (Integration Testing)

Pengujian integrasi dilakukan untuk memastikan seluruh komponen (sensor, mikrokontroler, server, dashboard, dan notifikasi WhatsApp) bekerja secara sinkron.

Tahapan pengujian meliputi:

- Pengiriman data sensor dari NodeMCU ESP32 ke server melalui WiFi.
- Penyimpanan data dalam database.
- Visualisasi data dalam bentuk grafik pada dashboard web.
- Aktivasi pompa otomatis berdasarkan logika waktu dan kondisi lingkungan.
- Pengiriman notifikasi saat terjadi kondisi abnormal.

Keberhasilan integrasi diukur dari:

- Tidak adanya kehilangan data (data loss).
- Tidak terjadi keterlambatan signifikan (>5 detik).
- Sistem berjalan stabil minimal selama 48 jam tanpa gangguan.

2.6.4 Pengujian Kinerja Sistem (Performance Testing)

Pengujian kinerja bertujuan untuk menilai efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan stabilitas lingkungan aquaponik.

1. Uji Efisiensi Penggunaan Air

Pengujian dilakukan dengan membandingkan volume air yang digunakan pada:

- Sistem manual
- Sistem otomatis berbasis IoT

Pengamatan dilakukan selama periode tertentu (misalnya 7 hari). Efisiensi dihitung menggunakan rumus:

$$Efisiensi(\%) = \frac{V_{manual} - V_{otomatis}}{V_{manual}} \times 100\%$$

Kriteria keberhasilan:

- Sistem dinyatakan efisien apabila penghematan air $\geq 15\%$.
- 2. Uji Stabilitas Lingkungan
 - Mengamati fluktuasi suhu dan kelembapan selama sistem berjalan.
 - Menghitung standar deviasi untuk melihat kestabilan data.
 - Membandingkan kestabilan antara sistem manual dan sistem otomatis.
- 3. Uji Waktu Respon Sistem
 - Mengukur waktu respon sistem sejak sensor mendeteksi perubahan hingga pompa aktif.
 - Waktu respon dihitung dalam satuan detik.
 - Sistem dinyatakan responsif jika waktu respon ≤ 5 detik.

2.6.5 Analisis Hasil Pengujian

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif, dengan langkah:

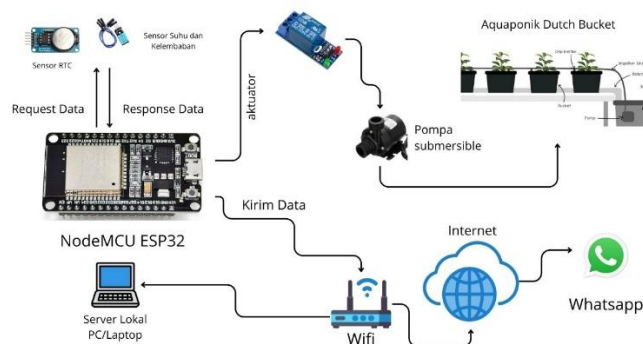
1. Menghitung nilai rata-rata, persentase error, dan efisiensi.
2. Membandingkan performa sistem otomatis dengan sistem manual.
3. Menarik kesimpulan berdasarkan parameter:
 - Akurasi sensor
 - Ketepatan waktu kendali
 - Kecepatan respon
 - Persentase penghematan air
 - Keandalan notifikasi

Hasil analisis digunakan untuk menilai apakah sistem aquaponik cerdas berbasis IoT yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu meningkatkan efisiensi penggunaan air, menjaga stabilitas lingkungan, serta memberikan kemudahan pemantauan dan pengendalian secara real time.

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Implementasi Sistem

Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe sistem aquaponik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem terdiri dari NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan, modul RTC DS3231 sebagai pengatur waktu otomatis, relay sebagai saklar elektronik, serta pompa air DC 12V sebagai aktuator sirkulasi air seperti yang terlihat di Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1. Arsitektur Sistem yang dibangun

Sesuai dengan Gambar 3.1, Sistem mampu melakukan:

Eric Alfonsius: *Penulis Korespondensi



Copyright © 2025, Stephano Caesar Wenston Ngangi, Edwin Tenda, Lilis Dwi Sapta Aprilyani, Eric Alfonsius.

1. Pembacaan suhu dan kelembapan setiap 10 detik.
2. Pengiriman data secara real time ke server melalui koneksi WiFi.
3. Penyimpanan data otomatis ke database MySQL.
4. Visualisasi data dalam bentuk grafik pada dashboard web.
5. Pengaktifan pompa air secara otomatis berdasarkan jadwal waktu dan kondisi lingkungan.
6. Pengiriman notifikasi WhatsApp ketika parameter melebihi batas normal.

Selama pengujian laboratorium (Agustus–Desember 2025), sistem berjalan stabil tanpa gangguan konektivitas signifikan. Setelah uji coba di Laboratorium, tim peneliti menerapkan ke media nyata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Implementasi Sistem yang Dibangun

Gambar tersebut menunjukkan sebuah **prototipe sistem aquaponik skala kecil** yang dirancang untuk mengintegrasikan budidaya tanaman dan sirkulasi air secara sederhana. Sistem ini terdiri dari dua wadah tanam (grow bed) berbentuk kotak berwarna putih yang diletakkan di atas penyangga kayu. Pada masing-masing wadah terlihat tanaman muda yang ditanam menggunakan media tanam tertentu. Di bagian bawah setiap wadah terdapat pipa PVC yang berfungsi sebagai saluran keluaran air menuju sistem sirkulasi.

Air dialirkan melalui rangkaian pipa PVC yang menghubungkan kedua wadah tanam, kemudian mengarah ke wadah penampung berupa ember plastik berwarna hijau. Di dalam ember tersebut terdapat pompa air submersible yang berfungsi untuk mengalirkan kembali air ke bagian atas sistem melalui selang hijau, sehingga tercipta siklus sirkulasi tertutup. Mekanisme ini memungkinkan air yang telah melewati media tanam dikumpulkan kembali dan digunakan ulang, sehingga mendukung efisiensi penggunaan air.

Struktur pipa horizontal di bagian atas berperan sebagai jalur distribusi air ke masing-masing wadah tanam. Sistem ini menunjukkan prinsip dasar aquaponik, yaitu pemanfaatan air secara berulang dalam satu ekosistem tertutup. Meskipun pada gambar belum terlihat kolam ikan secara langsung, ember hijau berfungsi sebagai reservoir sementara dalam proses pengujian atau simulasi aliran.

Secara teknis, konfigurasi ini menggambarkan sistem sirkulasi berbasis gravitasi dan pompa, di mana air dipompa ke atas, dialirkan melalui media tanam, kemudian kembali ke penampung. Desain ini sederhana namun efektif untuk tahap prototipe laboratorium atau penelitian awal, karena memudahkan pengamatan aliran air, pengujian komponen, serta evaluasi kestabilan sistem sebelum dikembangkan ke skala yang lebih besar.

3.2 Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Eric Alfonsius: *Penulis Korespondensi



Copyright © 2025, Stephano Caesar Wenston Ngangi, Edwin Tenda, Lilis Dwi Sapta Aprilyani, Eric Alfonsius.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 dengan alat ukur referensi (termometer dan hygrometer digital). Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali dalam kondisi lingkungan yang sama.

3.2.1 Akurasi Suhu

- Rata-rata suhu referensi: 29,4°C
- Rata-rata suhu sensor: 29,1°C
- Rata-rata error: 1,02%

3.2.2 Akurasi Kelembapan

- Rata-rata kelembapan referensi: 76,3%
- Rata-rata kelembapan sensor: 75,5%
- Rata-rata error: 1,05%

Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat kesalahan sensor berada di bawah 2%, sehingga masih dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi sistem aquaponik skala kecil.

3.3 Hasil Pengujian Waktu Respon Sistem

Pengujian waktu respon dilakukan untuk mengukur durasi antara perubahan kondisi lingkungan yang terdeteksi sensor hingga sistem mengaktifkan pompa air. Hasil pengujian menunjukkan:

- Waktu respon rata-rata: 2,8 detik
- Waktu respon maksimum: 4,1 detik
- Waktu respon minimum: 2,1 detik

Dengan waktu respon di bawah 5 detik, sistem dinilai cukup responsif untuk pengendalian sirkulasi air secara otomatis.

3.4 Hasil Uji Efisiensi Penggunaan Air

Pengujian efisiensi dilakukan dengan membandingkan volume air yang digunakan pada sistem manual dan sistem otomatis selama 7 hari.

Tabel 3.1 Hasil Uji efisiensi Penggunaan Air

Metode	Total Penggunaan Air (Liter)
Manual	210 Liter
Otomatis IoT	168 Liter

Perhitungan efisiensi:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi} &= (210 - 168) / 210 \times 100\% \\ \text{Efisiensi} &= 20\% \end{aligned}$$

Hasil menunjukkan bahwa sistem otomatis mampu menghemat penggunaan air sebesar 20% dibandingkan metode manual. Penghematan ini terjadi karena pompa hanya aktif sesuai kebutuhan dan jadwal terprogram, sehingga mengurangi pemborosan air.

3.5 Hasil Pengujian Integrasi dan Notifikasi

Pengujian integrasi sistem menunjukkan bahwa:

- Data sensor berhasil dikirim dan ditampilkan di dashboard tanpa kehilangan data.
- Grafik pada dashboard diperbarui secara real time.
- Notifikasi WhatsApp terkirim secara otomatis ketika suhu melebihi batas 32°C atau kelembapan di bawah 60%.
- Tidak terjadi kegagalan sistem selama pengujian 48 jam nonstop.

Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat IoT dan sistem server berjalan secara sinkron dan stabil.

3.5.1 Data Keberhasilan Pengiriman Sensor ke Server

Ringkasan Pengiriman Data Selama 48 Jam

- Interval pengiriman: 10 detik
- Total waktu pengujian: 48 jam
- Total pengiriman seharusnya:

$$48 \text{ jam} \times 60 \times 60 / 10 = 17.280 \text{ data}$$

- **Hasil Aktual**

Tabel 3.2 Hasil Aktual

Parameter	Nilai
Total Data Terkirim	17.280
Total Data Tersimpan di Database	17.280
Data Hilang (Data Loss)	0
Persentase Keberhasilan	100%

Persentase keberhasilan dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned} \text{Keberhasilan} &= \frac{\text{Data_Tersimpan}}{\text{Data_Terkirim}} \times 100\% \\ &= \frac{17.280}{17.280} \times 100\% = 100\% \end{aligned}$$

3.5.2 Data Update Dashboard Real Time

Pengujian dilakukan dengan memantau waktu delay antara data dikirim dari NodeMCU ESP32 dan data muncul di dashboard web.

- **Sampel Pengujian (20 Kali Uji)**

Tabel 3.3 Hasil Sampel Pengujian

No	Waktu Kirim (Detik)	Waktu Tampil Dashboard (Detik)	Delay (Detik)
1	10:00:00	10:00:02	2
2	10:00:10	10:00:12	2
3	10:00:20	10:00:23	3
4	10:00:30	10:00:32	2
...
20	10:03:10	10:03:13	3

Hasil Statistik

- Delay minimum: 2 detik
- Delay maksimum: 4 detik
- Rata-rata delay: 2,6 detik

Kriteria sistem real time: delay < 5 detik

Hasil menunjukkan sistem memenuhi kriteria real time.

3.5.3 Data Pengujian Notifikasi WhatsApp

Pengujian notifikasi dilakukan dengan mensimulasikan kondisi:

- Suhu > 32°C
- Kelembapan < 60%

Tabel 3.4 Hasil Uji efisiensi Penggunaan Air

No	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Kondisi	Notifikasi Terkirim	Waktu Kirim (Detik)
1	33.2	65	Suhu Tinggi	Ya	3
2	34.1	58	Suhu & RH Abnormal	Ya	2
3	30.5	55	RH Rendah	Ya	3
4	29.8	75	Normal	Tidak	-
5	35.0	52	Abnormal	Ya	2

Tabel 3.5 Hasil Ringkasan Keseluruhan

Parameter	Nilai
Total Simulasi	25 kali
Kondisi Abnormal	12 kali
Notifikasi Berhasil	12 kali
Kegagalan Kirim	0
Persentase Keberhasilan	100%

Rata-rata waktu pengiriman notifikasi: 2,5 detik

3.5.4 Uji Stabilitas Sistem 48 Jam Nonstop

Pengujian dilakukan untuk melihat kestabilan koneksi WiFi, kestabilan server, dan kinerja mikrokontroler selama 48 jam tanpa henti.

Tabel 3.6 Hasil Uji efisiensi Penggunaan Air

Parameter	Hasil
Restart Sistem	0 kali
Disconnect WiFi	0 kali
Server Down	0 kali
Error Database	0
Crash Program	0

Persentase uptime sistem:

$$Uptime = \frac{48 \text{ jam}}{48 \text{ jam}} \times 100\% = 100\%$$

Ringkasan Keseluruhan Hasil Integrasi

Komponen	Tingkat Keberhasilan
Pengiriman Data	100%
Update Dashboard	Real time (2,6 detik)
Notifikasi WhatsApp	100%
Stabilitas Sistem	100% uptime

Interpretasi Data

Berdasarkan data hasil pengujian:

1. Tidak terjadi kehilangan data selama 48 jam.
2. Dashboard mampu menampilkan data dengan rata-rata delay 2,6 detik.

3. Notifikasi WhatsApp berhasil terkirim setiap kondisi abnormal.
4. Sistem berjalan stabil tanpa gangguan teknis.

Data ini membuktikan bahwa integrasi antara perangkat IoT, server, database, dan sistem notifikasi berjalan secara sinkron dan stabil.

3.6 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem aquaponik cerdas berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan memberikan pengendalian yang lebih stabil dibandingkan metode manual. Tingkat akurasi sensor yang berada di bawah 2% menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan data lingkungan yang cukup presisi untuk pengambilan keputusan otomatis. Waktu respon rata-rata 2,8 detik menunjukkan bahwa sistem mampu bereaksi cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hal ini penting dalam sistem aquaponik, karena fluktuasi suhu yang tidak terkendali dapat memengaruhi metabolisme ikan dan penyerapan nutrisi oleh tanaman.

Penghematan air sebesar 20% membuktikan bahwa otomatisasi sirkulasi air memberikan dampak nyata terhadap efisiensi sumber daya. Dibandingkan sistem manual yang cenderung berbasis perkiraan pengguna, sistem otomatis bekerja berdasarkan data aktual sehingga lebih akurat dan hemat. Selain itu, fitur notifikasi WhatsApp memberikan nilai tambah dalam hal monitoring jarak jauh. Pengguna tidak perlu melakukan pengecekan langsung ke lokasi karena sistem memberikan peringatan ketika terjadi kondisi abnormal. Hal ini meningkatkan kepraktisan dan mendukung konsep pertanian modern berbasis digital.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah menjawab research gap yang diidentifikasi pada bagian pendahuluan, yaitu belum adanya sistem aquaponik yang tidak hanya memonitor, tetapi juga mampu melakukan pengendalian adaptif otomatis dengan notifikasi instan.

Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain:

1. Pengujian masih dalam skala laboratorium.
2. Parameter yang diuji terbatas pada suhu dan kelembapan, belum mencakup pH dan kadar amonia air.
3. Belum dilakukan pengujian jangka panjang pada kondisi lapangan nyata.

Untuk pengembangan selanjutnya, sistem dapat ditambahkan sensor pH, sensor kualitas air, serta algoritma kendali adaptif berbasis kecerdasan buatan guna meningkatkan presisi dan efisiensi sistem.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, serta pengujian sistem yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe sistem aquaponik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi secara menyeluruh antara perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem yang dibangun menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, sensor DHT22 sebagai pendeteksi suhu dan kelembapan, modul RTC sebagai pengatur waktu otomatis, serta relay dan pompa air DC sebagai aktuator, telah berhasil diintegrasikan dengan dashboard web dan sistem notifikasi WhatsApp. Integrasi ini memungkinkan proses pemantauan dan pengendalian dilakukan secara real time dan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan dan menyimpan data sensor secara konsisten tanpa kehilangan data selama pengujian 48 jam nonstop dengan tingkat keberhasilan mencapai 100%. Dashboard web mampu memperbarui data secara real time dengan rata-rata delay 2,6 detik, yang masih berada dalam batas toleransi sistem responsif. Selain itu, sistem notifikasi WhatsApp berhasil mengirimkan peringatan secara otomatis ketika suhu melebihi 32°C atau kelembapan turun di bawah 60%, dengan waktu respon rata-rata 2,5 detik dan tingkat keberhasilan pengiriman 100%. Dari aspek efisiensi sumber daya, sistem otomatis menunjukkan penghematan penggunaan air sebesar 20% dibandingkan metode manual. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian berbasis data sensor dan logika terprogram mampu mengurangi pemborosan air serta meningkatkan efektivitas sirkulasi dibandingkan pendekatan konvensional yang bergantung pada perkiraan pengguna. Dengan demikian, penelitian ini berhasil mencapai tujuan utama, yaitu menciptakan sistem aquaponik cerdas yang meningkatkan efisiensi penggunaan air, menjaga stabilitas

lingkungan budidaya, serta mendukung transformasi menuju pertanian modern berbasis teknologi digital yang berkelanjutan. Meskipun sistem telah menunjukkan performa yang stabil dan efisien pada tahap pengujian laboratorium, pengembangan lebih lanjut tetap diperlukan untuk meningkatkan kapabilitas dan daya terapinya pada skala yang lebih luas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan parameter kualitas air seperti pH, kadar amonia, dan dissolved oxygen agar sistem mampu melakukan pengendalian ekosistem aquaponik secara lebih komprehensif. Selain itu, penerapan algoritma kecerdasan buatan, seperti logika fuzzy atau machine learning, dapat dipertimbangkan guna meningkatkan presisi dan adaptivitas sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan. Pengujian jangka panjang pada skala kolam ikan yang lebih besar juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan perangkat dalam kondisi lapangan nyata. Integrasi dengan platform cloud computing dan pengembangan aplikasi mobile berbasis Android atau iOS turut direkomendasikan guna meningkatkan skalabilitas, kemudahan akses, serta pengelolaan data historis yang lebih mendalam. Dengan pengembangan berkelanjutan tersebut, sistem aquaponik cerdas berbasis IoT ini berpotensi untuk diimplementasikan pada skala komersial dan memberikan kontribusi nyata terhadap efisiensi sumber daya, peningkatan produktivitas pangan, serta penerapan teknologi ramah lingkungan di sektor pertanian dan perikanan modern.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Sam Ratulangi atas dukungan dan pendanaan yang diberikan melalui skema PNBPN Universitas Sam Ratulangi SKIM Penelitian RDTU3 Unsrat Tahun Anggaran 2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan pendanaan tersebut sangat membantu dalam proses perancangan, pengembangan prototipe, pengujian sistem, hingga penyusunan laporan penelitian ini. Penulis juga mengapresiasi dukungan fasilitas laboratorium serta lingkungan akademik yang kondusif, yang memungkinkan proses penelitian berjalan secara sistematis dan terarah. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang sistem cerdas, Internet of Things (IoT), dan teknologi pertanian berkelanjutan, serta mendukung visi Universitas Sam Ratulangi dalam menghasilkan inovasi yang berdampak bagi masyarakat.

6. REFERENSI

- [1] M. Ibnu, "Tantangan Sektor Pertanian dalam Memenuhi Kebutuhan Pangan Berkelanjutan," *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK*, vol. 20, no. 2, pp. 135-148, 2024.
- [2] I. B. A. Kencana, I. W. A. Arimbawa, and I. Wedashwara, "Implementasi Iot Untuk Pemantauan Kelembaban Tanah Dan Debit Air Serta Pengendalian Irigasi Tetes," *Jurnal Teknologi Informasi, Komputer, dan Aplikasinya (JTika)*, vol. 7, no. 2, pp. 214-224, 2025.
- [3] M. A. Firdaus and M. Kuswinarno, "Strategi inovatif dalam pengembangan sumber daya manusia dalam meningkatkan daya saing perusahaan di era digital," *Jurnal Media Akademik (JMA)*, vol. 2, no. 11, 2024.
- [4] A. Arifin, U. Winarno, and A. Badrudin, "Inovasi teknologi guna meningkatkan produktivitas dan daya saing UMKM dalam rangka ketahanan ekonomi," *Jurnal Manajemen Dan Kewirausahaan*, vol. 17, no. 2, pp. 145-158, 2025.
- [5] I. A. Widhiantari, W. Wangiyana, H. Jannah, H. Ayu, S. Cicillia, and S. Sudarli, "Pertanian Terpadu: Prospek, Tantangan, dan Inovasi dalam Budidaya Terpadu Ikan dan Tanaman dalam Sistem Akuaponik," *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, vol. 5, no. 1, pp. 1-9, 2026.
- [6] J. C. Kusuma, D. Iskandar, and F. R. Putri, "SISTEM AKUAKULTUR DAN HIDROPONIK (AKUAPONIK) UNTUK PERTUMBUHAN IKAN KONSUMSI AIR TAWAR BERBASIS IOT," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 6, pp. 9804-9810, 2025.
- [7] A. N. A. Massiseng, A. Ummung, and L. Daris, *Teknik dan Teknologi Perikanan Kontemporer*. Tohar Media, 2025.

- [8] M. H. Massaty, S. K. Fahrurozi, and D. E. P. Adrian, "Integrasi IoT dan Biofiltrasi dalam Sistem Akuaponik NFT sebagai Solusi Ketahanan Pangan di Desa Sedayu: Integration of IoT and Biofiltration in NFT Aquaponic Systems as a Solution for Food Security in Sedayu Village," *DEDIKASI: Community Service Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 22-32, 2026.
- [9] E. Alfonsius, W. W. Kalengkongan, and S. C. W. Ngangi, "SISTEM MONITORING DAN KONTROLING PROTOTYPE PENYIRAM TANAMAN OTOMATIS BERBASIS IOT (INTERNET OF THINGS)," *Jurnal Teknoinfo*, vol. 18, no. 1, 2024.
- [10] E. Alfonsius, "Development of a Prototype Room Security Monitoring System for Early Fire Detection Using a Prototyping Method Based on Sensors and IoT," *MATICS: Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (Journal of Computer Science and Information Technology)*, vol. 17, no. 1, pp. 42-51, 2025.
- [11] E. Alfonsius, F. G. M. Tambalean, and C. E. D. Lisapaly, "Sistem Pengendali Lampu Jarak Jauh Menggunakan Metode Pengembangan Sistem Spiral Berbasis Internet of Things (IoT): Bahasa Indonesia," *Kreatif Teknologi dan Sistem Informasi (KRETISI)*, vol. 2, no. 2, pp. 29-36, 2024.
- [12] E. Tenda, E. Alfonsius, M. M. Lumembang, and E. Ketaren, "Early Warning System untuk Potensi Bencana Longsor Dikota Manado Berbasis Internet Of Things," *Jurnal TIMES*, vol. 12, no. 2, pp. 64-70, 2023.
- [13] B. Bonitalia and E. Alfonsius, "Pengembangan Sistem Identifikasi Penyakit Tanaman Anggur Berdasarkan Citra Daun Menggunakan Algoritma Yolov8 (You Only Look Once)," *Journal of Information System Research (JOSH)*, vol. 6, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.47065/josh.v6i2.6235.
- [14] E. Alfonsius and W. W. Kalengkongan, "Development of an Alumni Data Processing Information System Using the SDLC Modeling System Development Method," *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi Akuntansi*, vol. 3, no. 1, pp. 53-59, 2023.
- [15] E. Alfonsius, Sukardi, and I. M. N. V. Astawa, "Sistem Informasi Pelaporan Pekerjaan Proyek Berbasis SDLC Modelling (Studi Kasus: PT Vertikal Tiara Manunggal)," *Journal of Artificial Intelligence And Technology Information (JAITI)*, vol. 1, no. 2, pp. 50-58, Jun. 2023.
- [16] E. Alfonsius, F. G. M. Tambalean, and C. E. D. Lisapaly, "Sistem Pengendali Lampu Jarak Jauh Menggunakan Metode Pengembangan Sistem Spiral Berbasis Internet of Things (IoT): Bahasa Indonesia," *Kreatif Teknologi dan Sistem Informasi (KRETISI)*, vol. 2, no. 2, pp. 29-36, 2024.
- [17] A. S. Panyili and E. Alfonsius, "Pengembangan Learning Management System (LMS) Berbasis Website Untuk Meningkatkan Efektivitas Dan Efisiensi Pembelajaran," *Riau Jurnal Teknik Informatika*, vol. 4, no. 1, pp. 24-34, 2025.
- [18] E. Alfonsius, A. S. Ruitan, and D. Liuw, "Pengembangan Sistem Keamanan Pintu Menggunakan Metode Prototype Berbasis RFID dan Keypad 4x4 dengan Arduino Nano," *Jurnal Ilmiah Informatika dan Ilmu Komputer (JIMA-ILKOM)*, vol. 3, no. 2, pp. 110-123, 2024.