

Pembuatan Perangkat Portabel Berbasis Mikrokontroler System on Chip Terintegrasi Android Sebagai Pendeteksi Kesuburan Tanaman dan Pakan Ikan Otomatis pada Sistem Akuaponik

Dafit Ody Endriantono¹, Sony Junianto^{2*}, M. Khabib Ridwan², Devani Febbecca Virgina Sudaryono¹,
Mochammad Ikhsan Ramadhoni³, Muhammad Fajrul Falah Subakti⁴

¹Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

²Departemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

³Departemen Teknologi Multimedia Kreatif, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

⁴Departemen Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

*E-mail: sony@pens.ac.id

Abstract

Aquaponics is a promising integrated farming system but is highly susceptible to failure due to environmental parameter instability. This research aims to design, develop, and evaluate a portable device called APITABOT for the automation and monitoring of aquaponic systems based on the Internet of Things (IoT). The device utilizes an ESP32 microcontroller as the main processing unit, connected to sensors for temperature, pH, TDS, humidity, and motion detection. An automatic control system is implemented to manage the heater, sprayer, solenoid pumps for pH-regulating solution and nutrient liquid injection, and a scheduled fish feeder. The research methodology includes prototype design, system schematics development, and functional testing. Sensor validation tests showed an error rate below 3%. Data acquisition and automatic control tests successfully maintained water parameters within the predefined thresholds. Connectivity testing to the Android application via Firebase showed an average delay of 1.8 seconds. The results discussion indicates that APITABOT effectively mitigates common failure risks in aquaponic systems. In conclusion, the device is functional, reliable, and has the potential to enhance efficiency and improve harvest success for aquaponic farmers

Kata kunci: Aquaponic System; Portable Device; Aquaponic Failure; Smart Farming

Abstrak

Akuaponik merupakan sistem pertanian terpadu yang menjanjikan, namun rentan terhadap kegagalan akibat ketidakstabilan parameter lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji perangkat portabel bernama APITABOT untuk otomatisasi dan monitoring sistem akuaponik berbasis *Internet of Things* (IoT). Perangkat ini menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang terhubung dengan sensor suhu, pH, TDS, kelembapan, dan gerak. Sistem kontrol otomatis diimplementasikan untuk mengatur heater, sprayer, pompa solenoid untuk injeksi larutan pengatur pH dan cairan nutrisi, serta pakan ikan terjadwal. Metode penelitian meliputi perancangan prototipe, pembuatan skema sistem, dan pengujian fungsional. Hasil pengujian validasi sensor menunjukkan error di bawah 3%. Pengujian akuisisi data dan kontrol otomatis berhasil menjaga parameter air dalam rentang yang ditetapkan. Pengujian konektivitas ke aplikasi Android melalui Firebase menunjukkan delay rata-rata 1.8 detik. Diskusi hasil menunjukkan bahwa APITABOT secara efektif dapat memitigasi risiko kegagalan umum pada akuaponik. Disimpulkan, perangkat ini fungsional, andal, dan berpotensi meningkatkan efisiensi serta keberhasilan panen bagi para petani akuaponik.

Kata kunci: Sistem Akuaponik; Perangkat Portabel; Kegagalan Akuaponik; Pertanian Cerdas

1. Pendahuluan

Di tengah tantangan ketahanan pangan dan degradasi lingkungan, sistem pertanian berkelanjutan menjadi sebuah keharusan [1]. Akuaponik, sebuah sistem yang mengintegrasikan akuakultur dengan hidroponik dalam satu ekosistem resirkulasi, menawarkan solusi yang sangat efisien dalam penggunaan air dan lahan, menjadikannya ideal untuk pertanian urban [2, 3]. Potensi ini sangat relevan untuk Indonesia, namun adopsinya menghadapi tantangan besar. Data dari komunitas menunjukkan tingkat kegagalan yang signifikan, dimana sekitar 35% praktisi pernah mengalami kegagalan panen total. Faktor utama kegagalan ini adalah ketidakmampuan mengelola parameter lingkungan yang dinamis [4]. Fluktuasi suhu air yang ekstrem, misalnya, dapat menyebabkan kematian massal ikan hingga 80% [5], sementara ketidakseimbangan pH dan nutrisi *Total Dissolved Solids* (TDS) secara langsung menghambat penyerapan nutrisi oleh tanaman, yang berujung pada gagal panen [6,7]. Masalah-masalah ini diperparah oleh kebutuhan pemantauan manual yang intensif dan rawan akan kelalaian manusia. Menjawab tantangan tersebut, penerapan

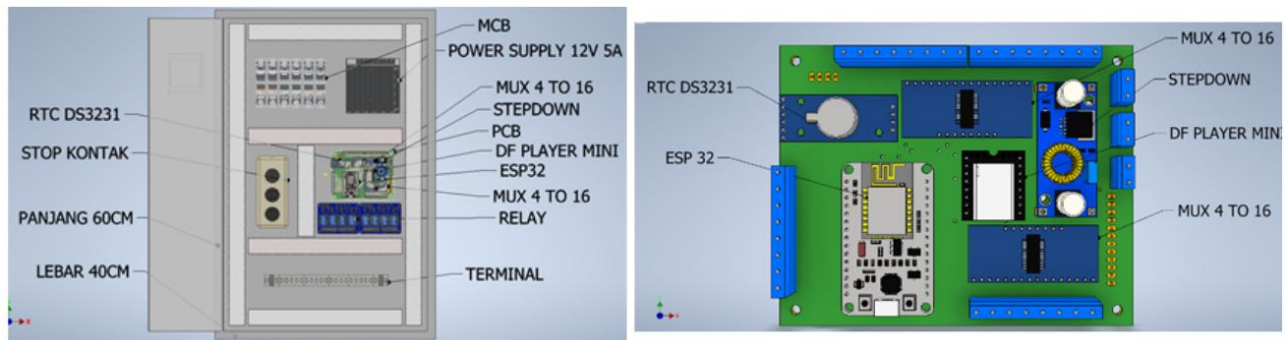
teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam konsep Pertanian Cerdas (*Smart Farming*) menawarkan solusi yang terbukti efektif [8]. Pemanfaatan mikrokontroler *System on Chip* (SOC) seperti ESP32 memungkinkan pengembangan perangkat monitoring dan kontrol yang terhubung ke internet, berbiaya rendah, dan hemat daya [9]. Penelitian sebelumnya telah banyak mengeksplorasi monitoring akuaponik, namun seringkali terbatas pada pemantauan pasif atau sistem kontrol yang tidak komprehensif [10,11]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah perangkat portabel terintegrasi bernama APITABOT. Inovasi ini dirancang untuk memonitor parameter kunci (suhu, pH, TDS, kelembapan) dan secara proaktif melakukan tindakan korektif melalui aktuatur untuk menjaga stabilitas ekosistem. Seluruh sistem dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh melalui aplikasi Android, sehingga dapat meminimalisir risiko kegagalan dan membantu petani mengelola sistem akuaponik secara efisien, bahkan saat tidak berada di lokasi [12].

2. Metode Penelitian

Tahapan dalam perancangan APITABOT pada penelitian meliputi perakitan komponen komponen alat, perancangan sistem mekanik dan elektronik dan kalibrasi alat.

2.1 Prototype Perangkat APITABOT

Prototipe dirancang sebagai sebuah unit portabel yang ringkas. Komponen utama terdiri dari Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan. Unit sensor mencakup sensor suhu tahan air DS18B20, sensor pH-4502C, sensor TDS Meter V1.0, sensor kelembapan dan suhu udara DHT-22, sensor gerak PIR HCSR501 untuk deteksi hama, serta modul RTC DS3231 untuk penjadwalan presisi. Unit aktuatur terdiri dari *heater* akuarium, *sprayer*, dua pompa solenoid 12V untuk larutan pH dan nutrisi, motor servo MG90S untuk mekanisme pakan, dan *speaker* sebagai alarm. Semua komponen dirakit dalam sebuah panel box pelindung dengan panjang, lebar dan tinggi 40cm x 60cm x 18cm untuk kemudahan instalasi dan mobilitas. Perancangan perangkat APITABOT dapat dilihat pada Gambar 1.

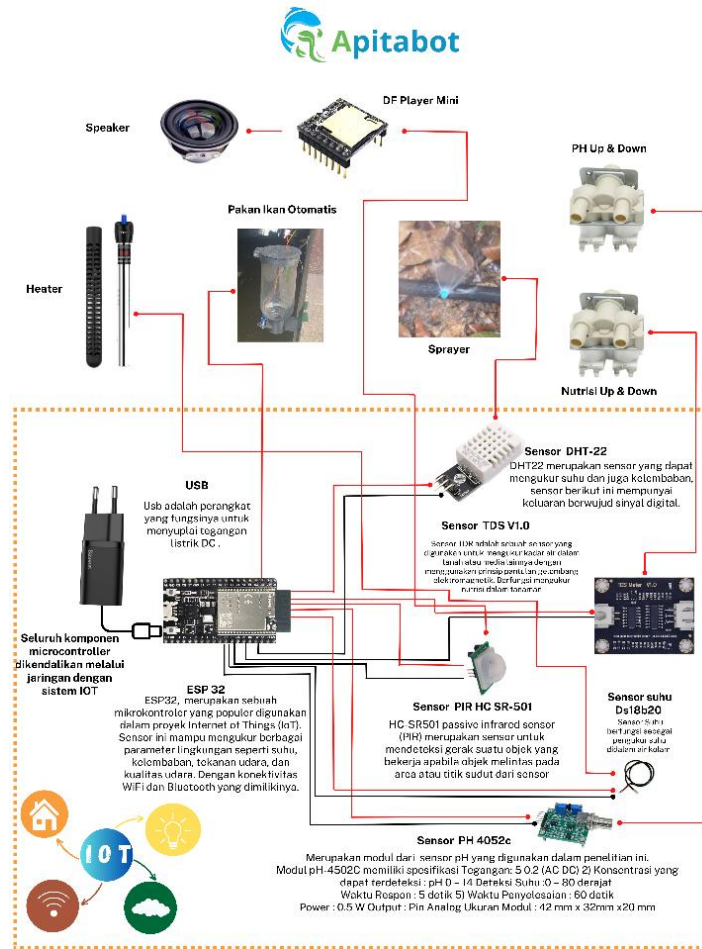


Gambar 1. Rancangan perangkat APITABOT

2.2 Skema Perancangan Perangkat APITABOT

Dalam Perangkat APITABOT dirancang sebagai sistem monitoring dan otomasi terpadu untuk akuaponik yang seluruh komponennya disusun dalam satu unit portabel berbasis mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali utama. Skema perancangan perangkat ditunjukkan pada Gambar 2.

Setiap sensor dihubungkan langsung ke pin *Input/Output* (I/O) ESP32 sesuai fungsinya. Sensor suhu air DS18B20 dan sensor pH-4502C berfungsi memantau parameter air, sementara sensor TDS Meter V1.0 mengukur tingkat nutrisi air. Sensor DHT-22 digunakan untuk mendeteksi suhu dan kelembapan udara sekitar, dan sensor PIR HCSR501 berfungsi mendeteksi pergerakan hama. Untuk menjaga akurasi waktu operasional, perangkat dilengkapi dengan modul RTC DS3231 yang memungkinkan penjadwalan presisi. Aktuatur dikendalikan melalui sinyal dari ESP32, yang meliputi pemanas air (*heater*) untuk menjaga suhu optimal, *sprayer* untuk pengaturan kelembapan, dua pompa solenoid 12V untuk injeksi larutan pH dan nutrisi, serta motor servo MG90S sebagai mekanisme pemberian pakan ikan. *Speaker* digunakan sebagai sistem peringatan lokal jika mendeteksi gerakan hama. Catu daya utama berasal dari adaptor DC 12V yang dialirkan ke sistem melalui modul *step-down* untuk disesuaikan dengan kebutuhan ESP32 dan aktuatur lainnya. Semua komponen ini disusun secara sistematis dalam panel box tertutup yang tahan terhadap lingkungan lembap, serta mendukung efisiensi perawatan dan kemudahan mobilitas di area pertanian akuaponik.



Gambar 2. Wiring diagram perangkat APITABOT

2.3 Sketsa Desain Aplikasi APITABOT

Aplikasi APITABOT dikembangkan menggunakan Android Studio dan terintegrasi dengan Firebase Firestore sebagai basis data untuk pengelolaan serta penyajian data secara *real-time*. Aplikasi ini dirancang sebagai pusat monitoring dan kontrol sistem akuaponik berbasis IoT yang dapat diakses melalui perangkat Android. Desain antarmuka aplikasi terlebih dahulu dibuat menggunakan Figma agar tampilannya responsif, terstruktur, dan mudah digunakan. Fungsionalitas utama dari aplikasi ini meliputi: (1) pemantauan suhu air secara *real-time*; (2) pemantauan pH air untuk memastikan kestabilan kualitas lingkungan akuaponik; (3) pemantauan kelembapan udara guna mendukung pertumbuhan tanaman; (4) pemantauan kualitas air berdasarkan nilai TDS; (5) penjadwalan otomatis pemberian pakan ikan sesuai waktu yang telah ditentukan; dan (6) kontrol manual terhadap penyiraman tanaman dan pemberian pakan. Sketsa antarmuka aplikasi ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa desain aplikasi perangkat APITABOT

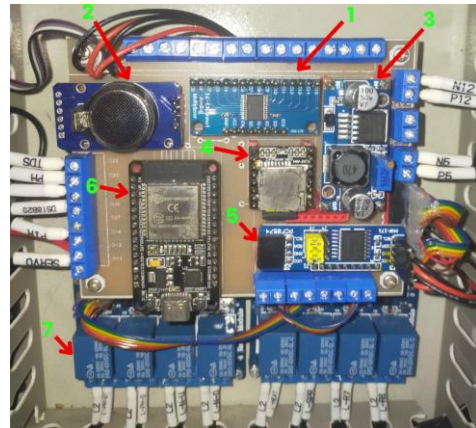
2.4 Alat Pendukung Pengujian

Dalam proses validasi sensor pada perangkat APITABOT, digunakan beberapa alat ukur sebagai pembanding. Thermohygrometer HTC-2 digunakan untuk membandingkan nilai kelembapan udara yang diukur oleh sensor DHT-22. Thermometer digital TP101 dimanfaatkan untuk menguji akurasi pengukuran suhu air oleh sensor DS18B20. Selain itu, digunakan juga pH meter dan TDS meter konvensional sebagai alat pembanding terhadap hasil pembacaan sensor pH-4502C dan sensor TDS Meter V1.0. Penggunaan alat-alat ini bertujuan untuk memastikan keakuratan sensor serta meningkatkan keandalan sistem monitoring pada perangkat APITABOT.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

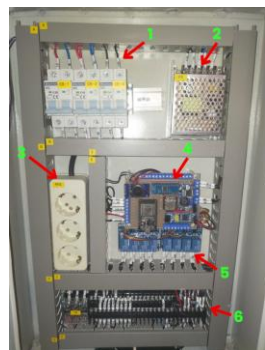
Hasil perancangan perangkat keras (*hardware*) APITABOT dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 4.



- Keterangan:
1. Mux 4 to 16
 2. RTC DS3231
 3. Stepdown LM2596
 4. DF Player Mini
 5. PCF8574
 6. ESP32
 7. Relay

Gambar 4. Hasil perancangan modul *Printed Circuit Board* (PCB) APITABOT

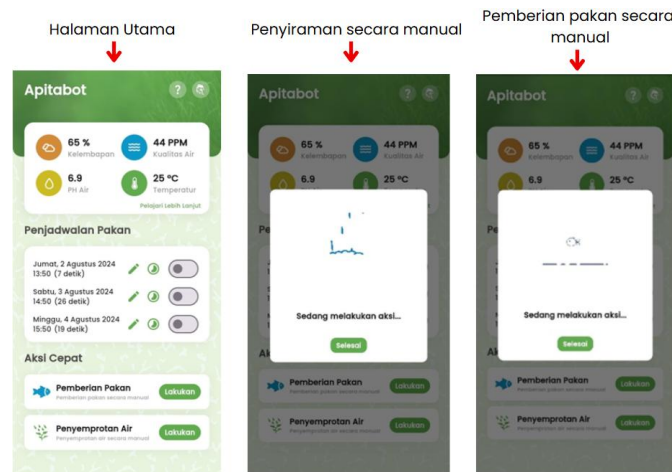
Seluruh komponen utama, termasuk modul ESP32, sensor, aktuator, serta catu daya, kemudian dikemas dalam sebuah panel box pelindung berukuran 40 cm × 60 cm × 18 cm. Dimensi ini dipilih untuk memberikan kemudahan instalasi, fleksibilitas pemindahan, dan perlindungan sistem terhadap gangguan fisik dari luar. Panel box ini memungkinkan APITABOT digunakan secara portabel di berbagai lokasi budidaya. Wujud akhir dari perangkat setelah dirakit dan dikemas ditampilkan pada Gambar 5.



- Keterangan:
1. MCB
 2. Power Supply 12V 5A
 3. Stop Kontak
 4. PCB
 5. Relay
 6. Terminal
 7. LCD

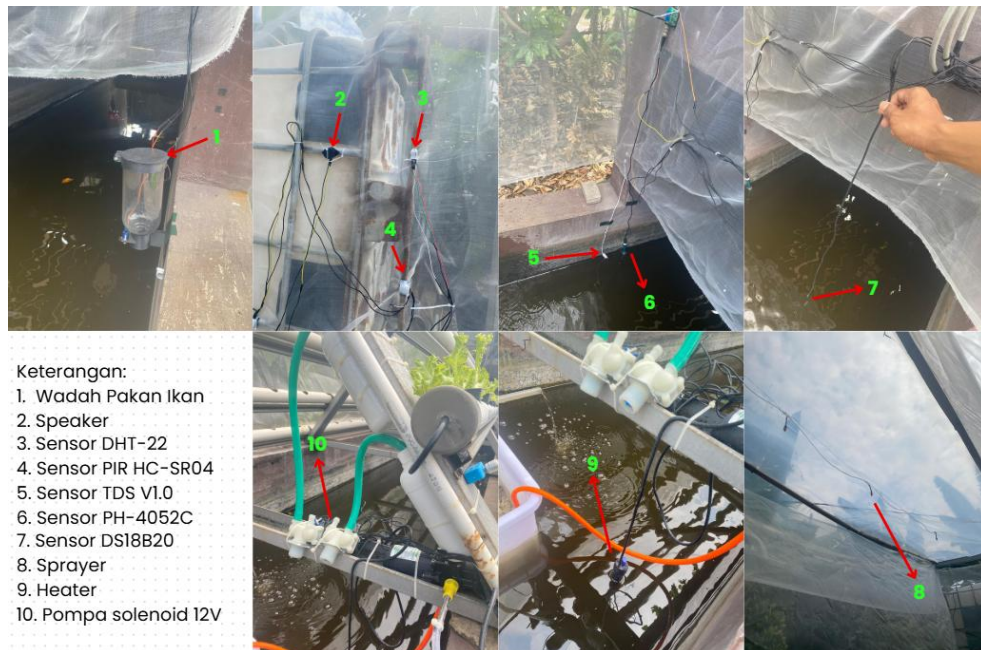
Gambar 5. Tampak dalam dan luar APITABOT

Setelah proses perakitan dan pengemasan selesai, perangkat keras APITABOT diintegrasikan dengan aplikasi berbasis Android yang dikembangkan melalui Android Studio dan terkoneksi dengan Firebase Firestore. Aplikasi ini berfungsi untuk menampilkan data suhu, pH, kelembapan, dan TDS secara *real-time*, serta menyediakan fitur kontrol manual dan penjadwalan otomatis pemberian pakan. Integrasi ini memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem akuaponik dari jarak jauh dengan antarmuka yang intuitif dan responsif. Tampilan hasil akhir dari aplikasi APITABOT dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan akhir aplikasi APITABOT

Perangkat yang telah sepenuhnya dirakit dan terintegrasi kemudian diuji coba secara langsung pada lingkungan budidaya akuaponik skala kecil. Dalam implementasinya, sensor-sensor ditempatkan sesuai posisi optimal di kolam ikan dan area tanaman, sedangkan aktuator dikalibrasi untuk merespons otomatis terhadap pembacaan sensor. Proses pemasangan APITABOT dalam sistem akuaponik ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pemasangan APITABOT dalam sistem akuaponik

3.2 Pengujian Perangkat APITABOT

Pengujian fungsionalitas dilakukan untuk memverifikasi kinerja setiap komponen dan sistem secara keseluruhan dalam perangkat APITABOT yaitu:

3.2.1 Validasi Sensor

Validasi sensor merupakan tahap krusial untuk memastikan akurasi data yang dibaca oleh perangkat APITABOT. Proses ini dilakukan dengan membandingkan pembacaan dari setiap sensor pada perangkat dengan alat ukur standar yang telah terkalibrasi. Setiap sensor diuji sebanyak lima kali pada kondisi yang berbeda untuk mengukur konsistensi dan akurasinya. Hasil pengujian untuk sensor lingkungan yang mengukur parameter kelembapan dan suhu air (Sensor DHT22 dan DS18B20) disajikan pada Tabel 1. Sementara itu, hasil pengujian untuk sensor yang mengukur nutrisi air dan pH (Sensor pH-4502C dan TDS V1.0) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil pengujian validasi sensor kelembapan dan suhu air

No.	Sensor Kelembapan (DHT-22) (%)	Alat Ukur (Thermohygrometer HTC-2) (%)	Error (%)	No	Sensor Suhu Air (DS18B20) (°C)	Alat Ukur (Thermometer TP101) (°C)	Error (%)
1.	41	42	2,38	1.	25.4	26.2	3,05
2.	53	55	3,63	2.	26.1	27	3,3
3.	62	64	3,63	3.	27.2	27.4	0,72
4.	70	71	1,40	4.	28.7	29	1,03
5.	73	74	1,35	5.	29	29.3	1,02
Rata-rata	-	-	2.48	-	-	-	1.82

Tabel 2. Hasil pengujian validasi sensor nutrisi air dan pH dengan Buffer 4,05 dan 7,06

Waktu (Menit)	Sensor pH (Buffer 4,05) (pH)	pH Meter (pH)	Error (%)	Waktu (Menit)	Sensor pH (Buffer 7,06) (pH)	pH Meter (pH)	Error (%)	Waktu (Menit)	Sensor Nutrisi Air (TDS) (PPM)	TDS Meter (PPM)	Error (%)
1.	4.13	4,05	1.97	1.	7,15	7,06	1.27	1.	1030	1025	0,48
2.	4.13	4,05	1.97	2.	7,15	7,06	1.27	2.	1032	1025	0,68
3.	4.14	4,05	2.20	3.	7,15	7,06	1.27	3.	1038	1025	1,26
4.	4.14	4,05	2,20	4.	7,15	7,06	1.27	4.	1040	1025	1,46
5.	4.15	4,05	2,46	5.	7,16	7,06	1,41	5.	1035	1025	0,97
Rata-rata	-	-	2.16	-	-	-	1.30	-	-	-	0.97

Dari kedua tabel tersebut, dapat dilihat bahwa semua sensor memiliki tingkat *error* yang rendah, dengan rata-rata keseluruhan sebesar 1,75%. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor-sensor yang digunakan pada perangkat APITABOT memiliki tingkat akurasi dan presisi yang memadai untuk kebutuhan monitoring dan kontrol dalam sistem akuaponik.

3.2.2 Pengujian Fungsionalitas Sistem dan Antarmuka

Pengujian fungsionalitas sistem dilakukan secara menyeluruh untuk memverifikasi bahwa setiap fitur otomatis dan kontrol manual pada perangkat APITABOT berjalan sesuai dengan rancangan. Pengujian ini mencakup simulasi berbagai kondisi lingkungan (seperti suhu rendah/tinggi, pH tidak seimbang) untuk melihat respons otomatis dari aktuator, serta pengujian fitur yang diinisiasi oleh pengguna melalui aplikasi Android. Hasil dari pengujian fungsionalitas ini dirangkum secara detail pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil pengujian sensor kelembapan (DHT-22) dan sensor suhu air (DS18B20)

No.	Kelembapan (%)	Sprayer	No	Suhu Air (°C)	Heater
1.	59.10	ON	1	27.44	Aktif
2.	59.35	ON	2	27.50	Aktif
3.	61.75	OFF	3	27.60	Aktif
4.	62.50	OFF	4	28.69	Tidak Aktif
5.	63.15	OFF	5	28.81	Tidak Aktif

Tabel 4. Hasil pengujian sensor gerakan hama (PIR-HCSR04) dan pembuka pakan ikan otomatis

No.	Deteksi Gerakan Hama	Speaker	No	Kondisi Pakan Ikan	Penutup Pakan Ikan
1.	Tidak ada gerakan – LED OFF	Tidak Aktif	1	ON	Terbuka
2.	Tidak ada gerakan – LED OFF	Tidak Aktif	2	ON	Terbuka
3.	Ada gerakan – LED ON	Aktif	3	ON	Terbuka
4.	Ada gerakan – LED ON	Aktif	4	OFF	Tertutup
5.	Ada gerakan – LED ON	Aktif	5	OFF	Tertutup

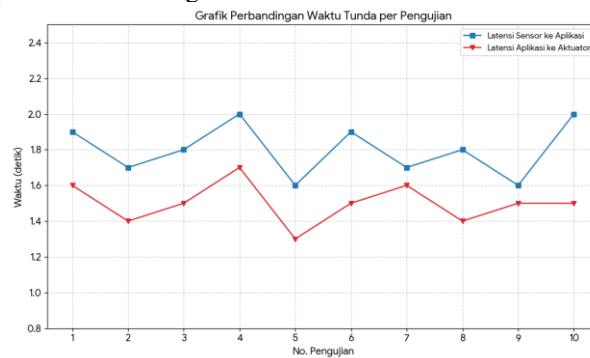
Tabel 5. Hasil pengujian sensor pH (pH-4502C) dan nutrisi air (TDS V1.0)

No.	Sensor PH Air	Solenoid Water Valve pH Up / Down	No	Sensor Nutrisi Air	Solenoid Water Valve Nutrisi Up / Down
1.	10.62	pH Down Aktif	1	808.69	Nutrisi Up Aktif
2.	10.10	pH Down Aktif	2	901.32	Nutrisi Up Aktif
3.	9.54	pH Down Aktif	3	1245.21	Nutrisi Down Aktif
4.	6.21	pH Up Aktif	4	1215.75	Nutrisi Down Aktif
5.	6.53	pH Up Aktif	5	1200,01	Nutrisi Down Aktif

Berdasarkan serangkaian pengujian yang disajikan pada ketiga tabel di atas, seluruh fitur utama perangkat APITABOT dapat dinyatakan berhasil dan berfungsi sesuai spesifikasi. Hasil pengujian terhadap fitur pengatur suhu, kelembapan, nutrisi, pH, deteksi hama, dan pemberian pakan ikan otomatis menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi ekspektasi pengguna dalam hal fungsionalitas, keandalan, dan responsivitas.

3.2.3 Pengujian Pengiriman Data Melalui Aplikasi

Pengujian ini mengukur waktu tunda (*latency*) antara perangkat, *cloud*, dan aplikasi. Rata-rata waktu yang dibutuhkan dari data direkam oleh sensor hingga tampil pada aplikasi Android adalah 1.8 detik. Waktu respons dari perintah manual yang dikirim dari aplikasi hingga aktuator dieksekusi adalah sekitar 1.5 detik. Fluktuasi waktu tunda dari 10 kali percobaan yang dilakukan dapat dilihat secara detail pada Gambar 8. Hasil ini menunjukkan konektivitas yang sangat responsif untuk keperluan monitoring dan kontrol.



Gambar 8. Grafik perbandingan waktu tunda per pengujian

3.3 Diskusi

Validasi sensor APITABOT terhadap alat ukur standar menunjukkan akurasi tinggi dengan rata-rata *error* di bawah 3% (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2). *Error* terbesar tercatat pada sensor kelembapan yaitu 3,63% dan terkecil pada suhu air yaitu 0,72%. Hasil ini memenuhi standar sistem monitoring akuaponik berbasis IoT, di mana ambang batas toleransi *error* parameter lingkungan umumnya dibatasi maksimal 5% untuk menjaga stabilitas sistem kontrol [13]. Dengan demikian, akurasi perangkat ini sangat layak untuk digunakan dalam otomatisasi sistem akuaponik.

Pada pengujian fungsionalitas sistem dan konektivitas antarmuka, semua fitur yang dirancang dapat bekerja sesuai ekspektasi. Dari pengujian pada Tabel 3, 4, dan 5, sistem otomasi untuk suhu, kelembapan, pH, nutrisi, hingga pakan ikan otomatis berhasil merespons berbagai skenario yang diberikan. Untuk konektivitas, pengujian waktu tunda (*latency*) yang hasilnya divisualisasikan pada Gambar 8 menunjukkan performa yang sangat responsif. Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk data dari sensor tampil di aplikasi Android (*Uplink*) adalah 1.8 detik, sedangkan waktu untuk perintah dari aplikasi dieksekusi oleh aktuator (*Downlink*) adalah 1.5 detik. Hal ini membuktikan bahwa arsitektur IoT yang digunakan dapat bekerja dengan andal dan cepat.

Dari segi analisis biaya, total Harga Pokok Produksi (HPP) untuk pembuatan satu unit perangkat APITABOT adalah sekitar Rp 3.000.000. Jika dibandingkan dengan solusi di pasaran, pengguna harus membeli beberapa perangkat terpisah seperti *pH controller*, *temperature controller*, dan *auto feeder* yang jika ditotal biayanya bisa melebihi HPP APITABOT, namun belum terintegrasi dalam satu sistem. Dengan potensi harga jual Rp 6.000.000, APITABOT menawarkan sebuah solusi *all-in-one* yang tidak hanya lebih terjangkau tetapi juga memberikan nilai tambah luar biasa berupa kemudahan kontrol dan monitoring terpusat melalui smartphone, sebuah fitur yang jarang ditemukan pada perangkat-perangkat terpisah.

4. Kesimpulan

Perangkat monitoring dan kontrol akuaponik APITABOT yang dibuat dapat bekerja dengan sangat baik dan andal. Tingkat akurasi sensor yang tinggi dibuktikan dengan nilai *error* terbesar hanya 3.63% dan terkecil 0.72% saat divalidasi dengan alat ukur standar. Semua fitur otomasi berhasil berfungsi sesuai rancangan, mampu menjaga stabilitas lingkungan akuaponik secara proaktif. Sistem konektivitas perangkat menunjukkan kinerja responsif dengan durasi waktu tunda rata-rata 1.8 detik untuk monitoring (sensor ke aplikasi) dan 1.5 detik untuk kontrol (aplikasi ke aktuator). Dengan biaya produksi yang jauh lebih efisien (Rp 3.000.000) dibandingkan membeli perangkat kontrol secara terpisah, APITABOT berhasil memberikan solusi pertanian cerdas yang terintegrasi, efektif, dan terjangkau.

Daftar Pustaka

- [1] M. A. Khamis, S. S. A. Shariff, and N. A. M. Nasir. 2023. "The role of sustainable agriculture in ensuring food security," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 1167(1): p. 012041.
- [2] S. Goddek, B. Delaide, U. Mankasingh, K. V. Ragnarsdottir, H. Jijakli, and R. H. Thorarinsdottir. 2021. "Vangogh's potato eaters: The tragedy of modern food systems," *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 5:p. 627918.

- [3] D. C. S. N. Putri and I. P. A. Wiguna. 2022. "Aquaponics: A Strategy for Sustainable Urban Farming," *Journal of Sustainable Agriculture*. 35(2):112-125.
- [4] H. A. P. Candra, A. Susanto, dan A. B. D. Cahyono. 2022. "Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan pada Sistem Akuaponik Skala Rumah Tangga di Indonesia," *Jurnal Perikanan dan Kelautan*. 12(1):45-53.
- [5] I. W. B. Suryawan, A. A. N. B. Kamajaya, and I. N. S. 2023. Miarsa, "Impact of Water Temperature Fluctuation on Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Survival Rate in Controlled Aquaculture Systems," *Indonesian Journal of Aquaculture*. 22(1):4-41.
- [6] S. P. Lestari dan D. Hartono. 2024. "Pengaruh pH dan Total Dissolved Solids (TDS) terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.) pada Sistem Akuaponik," *Agrotech Journal*. 7(2):88-95.
- [7] F. E. Putra dan A. S. Wiguna. 2023. "Rancang Bangun Sistem Kontrol pH Air dan Pemberian Pakan Ikan Otomatis Pada Akuaponik Berbasis Mikrokontroler," *Journal of Information System Research (JOSH)*. 5(1):20-128.
- [8] R. A. Pratama, H. Harliana, dan P. Puspitasari. 2022. "Sistem Monitoring Kualitas Air Real-time pada Budidaya Akuaponik Lele dan Kangkung Menggunakan Platform Blynk," *CYBERNET: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*. 3(1):22-30.
- [9] S. A. Wibowo, A. A. S. Gunawan, dan I. K. D. Aryanta. 2021. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air Akuakultur Berbasis IoT Menggunakan Mikrokontroler ESP32," *Jurnal Spektrum*. 9(2):120-128.
- [10] M. Abdullah and L. Mazalan. 2022. "Smart Automation Aquaponics Monitoring System," *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*. 6(1-2):256-263.
- [11] M. R. A. Wahab, Fathahillah, dan Jamaluddin. 2021. "Rancang Bangun Prototipe Sistem Kontroling dan Monitoring Pada Akuaponik Menggunakan Mikrokontroler," *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*. 7(2):1-23.
- [12] B. Setiawan, S. Styawati, dan S. Alim. 2024. "Implementasi Sistem IoT Pada Akuakultur Dan Hydroponik (Akuaponik) Modern Untuk Pertumbuhan Ikan Nila," *Jurnal Informatika Jurnal Pengembangan IT*. 9(1):47-53.
- [13] Wan, S., Zhao, K., Lu, Z., Li, J., Lu, T., & Wang, H. 2022. "A Modularized IoT Monitoring System with Edge-Computing for Aquaponics." *Sensors*. 22(23), 9260. <https://doi.org/10.3390/s22239260>.