

SISTEM AKUAPONIK CERDAS BERTENAGA SURYA UNTUK PRODUKSI PANGAN BERKELANJUTAN

TESIS

Oleh
Adhiguna
7312411012

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Terapan Program Studi Teknik Komputer



**PROGRAM STUDI
MAGISTER TERAPAN TEKNIK KOMPUTER
POLITEKNIK NEGERI BATAM
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM AKUAPONIK CERDAS BERTENAGA SURYA UNTUK PRODUKSI PANGAN BERKELANJUTAN

Oleh
Adhiguna
7312411012

Telah diuji dan dipertahankan di depan Tim Penguji
dalam Sidang Akhir Tesis
pada tanggal 30 Juli 2026

polibatam
Batam, 17 Juli 2026

Disetujui dan disahkan oleh:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Andy Triwinarko, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197910072012121001



Didi Istardi, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197711182012121002

LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **Adhiguna**
NIM : **7312411012**
Program Studi : Magister Terapan Teknik Komputer
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Batam
Judul Tesis : **Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya untuk
Produksi Pangan Berkelanjutan**

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai tulisan atau pikiran saya sendiri.

Semua sumber yang dirujuk dan/atau dikutip dalam tesis ini telah saya nyatakan dengan benar dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa tesis ini merupakan hasil plagiat, baik sebagian maupun keseluruhan, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku, termasuk pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya tanpa adanya paksaan dari pihak manapun, untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Batam, 13 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Adhiguna

NIM. 7312411012

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya untuk Produksi Pangan Berkelanjutan" dengan baik. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Magister Terapan Teknik Komputer (M.Tr.T) pada Program Studi Magister Terapan Teknik Komputer Politeknik Negeri Batam.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian tesis ini tidak akan terwujud tanpa adanya bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Direktur Politeknik Negeri Batam beserta seluruh jajaran pimpinan yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama penulis menempuh pendidikan magister.
2. Ibu **Metta Santiputri, S.T., M.Sc, Ph. D**, Ketua Program Studi Magister Terapan Teknik Komputer Politeknik Negeri Batam yang telah memberikan dukungan akademik dan kemudahan selama proses penyusunan tesis ini.
3. Bapak **Andy Triwinarko, ST., MT., Ph. D**, selaku dosen pembimbing utama, atas kesabaran, ketulusan, dan dedikasi beliau dalam memberikan arahan, bimbingan, kritik konstruktif, dan motivasi yang sangat berharga selama proses penelitian dan penulisan tesis ini.
4. Bapak **Didi Istardi, S.T., M.Sc. Ph. D**, selaku dosen pembimbing kedua, atas kesabaran, ketulusan, dan dedikasi beliau dalam memberikan arahan, bimbingan, kritik konstruktif, dan motivasi yang sangat berharga selama proses penelitian dan penulisan tesis ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar Program Studi Magister Terapan Teknik Komputer Politeknik Negeri Batam yang telah membagikan ilmu, pengalaman, dan inspirasi selama masa perkuliahan.

6. Staf administrasi dan teknisi laboratorium yang telah membantu kelancaran proses akademik dan kegiatan eksperimen selama penelitian.
7. Kedua orang tua, istri, dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan moril, materil, serta semangat tanpa henti sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini dengan baik.
8. Rekan-rekan mahasiswa Magister Terapan Teknik Komputer angkatan 2024/2025, atas kebersamaan, diskusi, dan kerja sama yang telah terjalin selama menempuh pendidikan.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan kontribusi baik langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kata sempurna mengingat keterbatasan pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi Internet of Things, energi terbarukan, dan pertanian presisi, serta dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya

Batam, 21 Juni 2026

Penulis,



Adhiguna

NIM. 7312411012

ABSTRAK

SISTEM AKUAPONIK CERDAS BERTENAGA SURYA UNTUK PRODUKSI PANGAN BERKELANJUTAN

Sistem akuaponik skala rumah tangga menghadapi tiga masalah pokok, yaitu ketergantungan pada listrik jaringan konvensional (PLN), kebutuhan pemantauan manual yang intensif, dan tuntutan keterampilan teknis yang tinggi. Penelitian ini bertujuan merancang, membangun, dan menguji sistem akuaponik cerdas yang mengintegrasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk otomasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* guna mencapai kemandirian energi. Pendekatan yang digunakan adalah metode Penelitian dan Pengembangan (*Research and Development*) model 4-D. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32-C3, sensor pH E-201-C, sensor suhu DS18B20, dan RTC untuk mengendalikan pompa sirkulasi (melalui relay) serta pemberi pakan otomatis (servo SG90); catu daya bersumber dari panel surya 100 Wp, baterai VRLA 12V 100Ah, dan *solar charge controller* PWM 20A. Komunikasi data memanfaatkan protokol MQTT dengan *backend* Node.js–MySQL dan aplikasi web *Smart Aquaponics* berbasis React.js yang dilengkapi fitur kalibrasi pH dua titik interaktif. Temuan penting menunjukkan sensor pH mencapai akurasi 99,57% (galat absolut rata-rata 0,028) dan sensor suhu berselisih rata-rata 0,2°C; aktuator pompa dan pemberi pakan beroperasi sesuai jadwal dengan deviasi berturut-turut ≤ 2 detik dan ≤ 1 detik; seluruh pengujian fungsional *black-box* berhasil (100%) dengan waktu respons di bawah dua detik; serta sistem PLTS memenuhi kebutuhan energi harian 272 Wh secara mandiri selama tujuh hari dengan ketersediaan (*uptime*) 99,86% dan keberhasilan pengiriman data 99,79%. Satu keterbatasan teridentifikasi berupa waktu stabilisasi sensor pH E-201-C yang relatif lama (sekitar 15–30 menit), sehingga direkomendasikan peningkatan ke sensor pH kelas industri atau laboratorium yang lebih andal, akurat, dan presisi. Disimpulkan bahwa seluruh tujuan penelitian tercapai dan penggabungan pertanian cerdas, IoT, serta energi terbarukan ke dalam satu prototipe fungsional merupakan solusi produksi pangan yang berkelanjutan, hemat lahan, hemat air, dan mandiri energi. Implikasinya, sistem ini mengurangi beban pemantauan manual, menghapus ketergantungan pada listrik jaringan sehingga dapat diterapkan di lokasi terpencil, menurunkan hambatan keterampilan teknis, dan menawarkan model yang dapat direplikasi untuk penguatan ketahanan pangan rumah tangga.

Kata kunci: akuaponik cerdas, Internet of Things, panel surya, ESP32-C3, produksi pangan berkelanjutan

ABSTRACT

SOLAR-POWERED SMART AQUAPONICS SYSTEM FOR SUSTAINABLE FOOD PRODUCTION

Household-scale aquaponic systems face three principal problems: dependence on the conventional electricity grid, the need for intensive manual monitoring, and high technical-skill requirements. This research aims to design, build, and test a smart aquaponic system that integrates Internet of Things (IoT) technology for automation with an off-grid Solar Power Plant (PV system) to achieve energy independence. The approach employed is the Research and Development (R&D) method using the 4-D model. The system was built using an ESP32-C3 microcontroller, an E-201-C pH sensor, a DS18B20 temperature sensor, and an RTC to control the circulation pump (via a relay) and an automatic feeder (SG90 servo); power is supplied by a 100 Wp solar panel, a 12V 100Ah VRLA battery, and a 20A PWM solar charge controller. Data communication uses the MQTT protocol with a Node.js–MySQL backend and a React.js-based Smart Aquaponics web application featuring an interactive two-point pH calibration. Key findings show that the pH sensor achieved 99.57% accuracy (mean absolute error 0.028) and the temperature sensor had an average deviation of 0.2°C; the pump and feeder actuators operated on schedule with maximum deviations of 2 and 1 seconds, respectively; all black-box functional tests passed (100%) with response times under two seconds; and the PV system independently met the daily energy demand of 272 Wh over seven days with 99.86% uptime and 99.79% data transmission success. One limitation identified is the relatively long stabilization time of the E-201-C pH sensor (approximately 15–30 minutes), so an upgrade to a more reliable, accurate, and precise industrial or laboratory-grade pH sensor is recommended. It is concluded that all research objectives were achieved and that combining smart farming, IoT, and renewable energy into a single functional prototype constitutes a sustainable, land-efficient, water-efficient, and energy-independent food production solution. The implications are that the system reduces the manual monitoring burden, removes dependence on the electricity grid so it can be deployed in remote locations, lowers the technical-skill barrier, and offers a replicable model for strengthening household food security.

Keywords : smart aquaponics, Internet of Things, solar panel, ESP32-C3, sustainable food production

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	1
LEMBAR PERNYATAAN	2
KATA PENGANTAR	3
ABSTRAK	5
ABSTRACT	6
DAFTAR ISI	7
DAFTAR GAMBAR	10
DAFTAR TABEL	11
BAB I PENDAHULUAN	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan Masalah	14
1.3 Tujuan Penelitian	15
1.4 Manfaat Penelitian	15
1.5 Batasan Penelitian	16
BAB II STUDI LITERATUR	18
2.1 Akuaponik	18
2.1.1 Definisi dan Prinsip Kerja	18
2.1.2 Komponen Utama Sistem Akuaponik	19
2.1.3 Jenis-jenis Sistem Akuaponik	20
2.2 Parameter Kunci Kualitas Air: pH	20
2.2.1 Definisi pH	20
2.2.2 Peran Krusial pH dalam Akuaponik	21
2.2.3 Rentang pH Ideal	22
2.3 Parameter Kunci Kualitas Air: Suhu	22
2.3.1 Pentingnya Suhu Air dalam Sistem Akuaponik	23
2.3.2 Rentang Suhu Ideal untuk Sistem Akuaponik Secara Keseluruhan	24
2.3.3 Dampak Fluktuasi Suhu Air pada Sistem Akuaponik	25
2.4 Teknologi Internet of Things (IoT) untuk Pertanian	27
2.4.1 Definisi dan Arsitektur IoT	27
2.4.2 Penerapan IoT dalam Akuaponik (Studi Terdahulu)	28

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid.....	29
2.5.1 Prinsip Kerja PLTS	29
2.5.2 Komponen Sistem PLTS Off-Grid	29
2.5.3 Studi Terdahulu Pemanfaatan PLTS di Sektor Perikanan	30
2.6 Penelitian Terdahulu dan Kebaruan Penelitian	30
2.6.1 Analisis Kritis Penelitian Terdahulu	30
2.6.2 Kebaruan Penelitian (Research Novelty)	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	34
3.1 Jenis Penelitian.....	34
3.2 Metode Pengumpulan Data	35
3.3 Perancangan Sistem	36
3.3.1 Arsitektur Sistem Keseluruhan	36
3.3.2 Perancangan Perangkat Keras	38
3.3.3 Perancangan Perangkat Lunak	43
3.4 Diagram Use Case.....	45
3.5 Diagram Alir Sistem (Flowchart).....	47
3.6 Desain Antarmuka Pengguna (UI/UX Design).....	50
3.7 Work Breakdown Structure (WBS)	53
3.8 Jadwal Penelitian (Timeframe)	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Hasil Implementasi Sistem.....	58
4.1.1 Implementasi Perangkat Keras.....	59
4.1.2 Implementasi Sistem Catu Daya Tenaga Surya (PLTS)	60
4.1.3 Implementasi Firmware Mikrokontroler.....	60
4.1.4 Implementasi Backend dan Basis Data	61
4.1.5 Implementasi Aplikasi Web <i>Smart Aquaponics</i>	61
4.2 Kalibrasi Sensor	63
4.2.1 Kalibrasi Sensor pH	63
4.2.2 Kalibrasi pH Interaktif Berbasis Dasbor	64
4.2.3 Validasi Sensor Suhu DS18B20	66
4.3 Skenario dan Lingkungan Pengujian	66
4.4 Pengujian Akurasi Sensor	67
4.4.1 Akurasi Sensor pH	67
4.4.2 Akurasi Sensor Suhu	69

4.5 Pengujian Fungsional (Black-Box)	70
4.6 Pengujian Aktuator.....	71
4.6.1 Pengujian Pompa Air	71
4.6.2 Pengujian Pemberi Pakan Otomatis	72
4.7 Pengujian Kinerja Sistem Catu Daya Tenaga Surya.....	73
4.8 Pengujian Keandalan Sistem (7×24 Jam)	75
4.9 Pengujian Waktu Respons (Latency)	77
4.9.1 Klarifikasi Teknis Mekanisme <i>Latency</i> Rendah pada Mode Hemat Daya	78
4.10 Pembahasan.....	80
4.10.1 Pemenuhan Tujuan Penelitian.....	80
4.10.2 Analisis Kebaruan dan Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu ...	81
4.10.3 Keterbatasan Sistem	81
4.10.4 Analisis Kelayakan Ekonomi (Cost-Benefit Analysis).....	82
4.10.5 Hasil Observasi Biologis Biota Akuaponik	84
BAB V PENUTUP.....	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arsitektur Sistem Akuaponik	19
Gambar 3.1. Use Case Diagram Sistem Akuaponik Cerdas	46
Gambar 3.2. Diagram Alir Logika Kontrol Pompa Air.....	47
Gambar 3.3. Diagram Alir Logika Pemberian Pakan Otomatis	49
Gambar 3.4. Mockup Dasbor Utama Sistem Akuaponik Cerdas	51
Gambar 3.5. Mockup Atur Jadwal Pakan.....	53
Gambar 3.6. Jadwal Penelitian (Timeframe).....	57
Gambar 4.1. Realisasi Arsitektur Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya .	59
Gambar 4.2. Tampilan Dasbor Utama Aplikasi Web Smart Aquaponics Hasil Implementasi	62
Gambar 4.3. Tampilan Notifikasi(Alert) Telegram yang diterima oleh user	63
Gambar 4.4. Kurva Kalibrasi Linear Sensor pH E-201-C.....	64
Gambar 4.5. Antarmuka Kalibrasi pH Interaktif Dua Titik pada Dasbor Smart Aquaponics sistem	65
Gambar 4.6. Korelasi Pembacaan Sensor pH Sistem terhadap pH Meter Standar	68
Gambar 4.7. Kinerja Sistem PLTS Off-Grid dalam Satu Hari	73
Gambar 4.8. Data Pemantauan pH Air Selama 7 Hari	76
Gambar 4.9. Data Pemantauan Suhu Air Selama 7 Hari.....	77
Gambar 4.10. Kondisi tanaman kangkung dan Ikan Nila pada hari ke-7 pengujian operasional mandiri sistem.....	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Rentang pH Ideal untuk Komponen Sistem Akuaponik	22
Tabel 2.2. Rentang Suhu Air Ideal untuk Komponen Sistem Akuaponik.....	24
Tabel 2.3. Perbandingan Penelitian Terdahulu yang Relevan.....	31
Tabel 3.1. Kebutuhan Perangkat Keras (Hardware Requirements)	42
Tabel 3.2. Kebutuhan Perangkat Lunak (Software Requirements).....	44
Tabel 3.3. Work Breakdown Structure (WBS) Proyek Akuaponik Cerdas	54
Tabel 4.1. Hasil Kalibrasi Tiga Titik Sensor pH E-201-C	63
Tabel 4.2. Hasil Satu Sesi Kalibrasi pH Interaktif Dua Titik.....	65
Tabel 4.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH terhadap pH Meter Standar.....	67
Tabel 4.4. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Suhu DS18B20	69
Tabel 4.5. Hasil Pengujian Fungsional Black-Box Aplikasi Web	70
Tabel 4.6. Hasil Pengujian Aktuator Pompa Air (Mode Otomatis)	71
Tabel 4.7. Hasil Pengujian Pemberi Pakan Otomatis.....	72
Tabel 4.8. Rekapitulasi Kinerja Harian Sistem PLTS Selama 7 Hari	73
Tabel 4.9. Hasil Pengujian Keandalan Sistem Selama 7×24 Jam	75
Tabel 4.10. Hasil Pengujian Waktu Respons Sistem	78
Tabel 4.11. Pemetaan Tujuan Penelitian terhadap Capaian Hasil.....	81
Tabel 4.12. Estimasi Perbandingan Anggaran Biaya (PLTS vs Konvensional) ..	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan jumlah penduduk global yang pesat, terutama di wilayah perkotaan, telah menimbulkan dua tantangan besar: penyempitan lahan pertanian akibat alih fungsi lahan menjadi pemukiman dan meningkatnya permintaan akan bahan pangan segar dan berkualitas. Fenomena urbanisasi ini menuntut adanya inovasi dalam teknologi pertanian untuk dapat memproduksi pangan secara efisien di lahan yang terbatas. Akuaponik, sebuah sistem budidaya terintegrasi yang menggabungkan akuakultur (pemeliharaan ikan) dan hidroponik (penanaman tanaman tanpa tanah), hadir sebagai salah satu solusi paling menjanjikan untuk menjawab tantangan tersebut. Sistem ini menawarkan efisiensi penggunaan lahan dan air yang sangat tinggi, karena air dari kolam ikan yang kaya nutrisi disirkulasikan untuk menyuburkan tanaman, dan sebaliknya, tanaman berfungsi sebagai filter biologis yang membersihkan air untuk ikan. Meskipun memiliki potensi besar, implementasi sistem akuaponik di Indonesia, khususnya pada skala rumah tangga dan UMKM, masih menghadapi berbagai kendala fundamental yang menghambat adopsi dan keberhasilannya. Masalah-masalah ini sebagian besar bersifat operasional dan teknis.

Pertama, ketergantungan yang sangat tinggi pada pasokan listrik konvensional (PLN). Jantung dari sistem akuaponik adalah pompa air yang harus beroperasi secara kontinu atau terjadwal untuk menjamin sirkulasi air. Sirkulasi ini krusial untuk tiga hal: (1) menyuplai oksigen terlarut bagi ikan, (2) mengalirkan nutrisi dari kotoran ikan ke akar tanaman, dan (3) menjaga stabilitas kualitas air. Apabila sirkulasi berhenti akibat pemadaman listrik, kualitas air akan menurun drastis, tingkat keasaman air meningkat (pH turun), dan dapat berujung pada kematian massal ikan dalam waktu singkat. Untuk mengatasi ini, beberapa pembudidaya terpaksa berinvestasi pada genset sebagai cadangan listrik, yang justru menambah biaya investasi awal dan biaya operasional.

Kedua, kebutuhan pemantauan manual yang intensif dan berulang.

Parameter kualitas air, terutama tingkat keasaman (pH) dan suhu, merupakan faktor kritis yang mempengaruhi kesehatan ikan, tanaman, dan bakteri nitrifikasi. Pengguna harus secara berkala datang ke lokasi untuk mengambil sampel air dan mengukurnya secara manual. Selain itu, pemberian pakan ikan juga seringkali dilakukan secara manual, yang menjadi tidak efisien terutama untuk jenis ikan nokturnal seperti lele, yang lebih aktif makan pada malam hari. Keterlambatan atau ketidakkonsistenan dalam pemantauan dan pemberian pakan dapat menghambat pertumbuhan dan menurunkan produktivitas.

Ketiga, kebutuhan akan keterampilan teknis yang spesifik. Pengelolaan sistem akuaponik yang berhasil menuntut pengguna untuk memiliki pemahaman yang baik tentang karakteristik ikan, kebutuhan nutrisi tanaman, dan dinamika kualitas air. Hal ini menjadi penghalang bagi masyarakat awam yang ingin memulai budidaya akuaponik di pekarangan rumah.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemanfaatan teknologi modern menjadi sebuah keniscayaan. Internet of Things (IoT) menawarkan solusi untuk mengotomatiskan proses pemantauan dan pengendalian sistem. Dengan mengintegrasikan sensor dan aktuator yang terhubung ke internet, pengguna dapat memantau kondisi akuaponik dari jarak jauh secara real-time dan sistem dapat melakukan tindakan korektif secara otomatis, seperti menyalakan pompa atau memberikan pakan sesuai jadwal.

Selanjutnya, untuk menjawab masalah ketergantungan pada listrik PLN, integrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi solusi yang ideal. Panel surya dapat menyediakan sumber energi yang mandiri, bersih, dan terbarukan untuk seluruh komponen elektrik sistem, seperti pompa, mikrokontroler, dan sensor. Sistem bertenaga surya ini tidak hanya memangkas biaya listrik bulanan tetapi juga membuat sistem akuaponik dapat diimplementasikan di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik PLN atau di lokasi yang sering mengalami pemadaman.

Berdasarkan sintesis dari permasalahan dan potensi solusi tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sebuah "Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya". Sistem ini dirancang untuk menjadi solusi komprehensif dengan mengintegrasikan teknologi IoT untuk otomatisasi dan energi surya untuk kemandirian energi. Sistem akan fokus pada pemantauan parameter paling krusial yaitu pH dan suhu, dan menggunakannya sebagai salah satu pemicu, bersama dengan penjadwalan waktu, untuk mengontrol aktuator utama: pompa air dan pemberi pakan otomatis. Seluruh sistem dapat dipantau dan dikendalikan melalui sebuah aplikasi web yang ramah pengguna sehingga diharapkan sistem akuaponik ini bisa memproduksi pangan yaitu ikan dan sayuran secara berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun arsitektur sistem terintegrasi yang menggabungkan perangkat keras (sensor pH, suhu, RTC; aktuator pompa, pemberi pakan; dan sistem panel surya) dengan perangkat lunak (logika kontrol mikrokontroler, aplikasi web) untuk monitoring dan otomasi sistem akuaponik secara efektif?
2. Bagaimana merancang dan membangun sebuah sistem akuaponik yang catu dayanya sepenuhnya mandiri dan mempertimbangkan efisiensi daya menggunakan panel surya untuk memenuhi kebutuhan listrik pompa air, mikrokontroler, sensor, dan aktuator lainnya?
3. Bagaimana mengimplementasikan algoritma kontrol pada mikrokontroler ESP32 untuk memproses data dari sensor pH dan suhu secara real-time, serta mengendalikan aktuator pompa air dan pemberi pakan otomatis berdasarkan kombinasi data sensor dan jadwal presisi dari Real-Time Clock (RTC)?
4. Bagaimana mengembangkan antarmuka aplikasi berbasis web yang fungsional dan intuitif bagi pengguna untuk dapat memantau kondisi sistem

dari jarak jauh, melihat data historis dalam bentuk grafik, dan melakukan intervensi kontrol secara manual jika diperlukan?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah:

1. Merancang sebuah arsitektur sistem akuaponik cerdas yang terintegrasi secara holistik, andal dalam operasional, dan efisien dalam penggunaan sumber daya.
2. Menghasilkan sebuah prototipe fungsional dari sistem akuaponik cerdas yang sepenuhnya ditenagai oleh panel surya, sehingga mencapai kemandirian energi.
3. Mengimplementasikan sistem kontrol otomatis untuk dua fungsi operasional krusial: sirkulasi air melalui pompa dan pemberian pakan ikan secara terjadwal.
4. Membangun sebuah aplikasi web yang responsif dan informatif sebagai dasbor pemantauan (monitoring) dan pusat kendali (controlling) bagi pengguna.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan bagi berbagai pihak, antara lain:

1. Bagi Petani/Pengguna Akuaponik:

- Mempermudah proses pengelolaan dan pemeliharaan sistem akuaponik melalui otomatisasi dan pemantauan jarak jauh.
- Mengurangi biaya operasional secara signifikan dengan menghilangkan tagihan listrik bulanan.
- Meningkatkan efisiensi kerja dan potensi produktivitas panen dengan menjaga kondisi lingkungan mikro akuaponik tetap optimal.

2. Bagi Lingkungan:

- Mendorong adopsi dan pemanfaatan energi terbarukan (energi surya) dalam sektor pertanian dan perikanan skala kecil.
- Mendukung konsep pertanian perkotaan (urban farming) yang berkelanjutan, hemat lahan, dan hemat air.
- Mengurangi jejak karbon yang dihasilkan dari penggunaan energi listrik berbasis fosil.

3. **Bagi Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi:**

- Memberikan kontribusi nyata pada bidang rekayasa sistem dan teknologi IoT untuk aplikasi pertanian presisi (precision agriculture).
- Menjadi referensi ilmiah dan teknis bagi peneliti, mahasiswa, atau praktisi lain yang ingin mengembangkan sistem serupa di masa depan.
- Menyediakan data empiris mengenai kinerja sistem akuaponik terintegrasi dengan PLTS di kondisi iklim tropis seperti Indonesia.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk menjaga agar penelitian ini tetap fokus dan mendalam, maka ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. **Sumber Daya Energi:** Sistem yang dikembangkan bersifat off-grid, artinya sumber energi listrik secara eksklusif berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dirancang khusus untuk kebutuhan operasional prototipe.
2. **Parameter Sensorik:** Pemantauan kualitas air dalam sistem ini hanya terbatas pada penggunaan jenis sensor, yaitu sensor pH dan suhu. Parameter penting lainnya seperti Total Dissolved Solids (TDS), kekeruhan (turbidity), atau kadar amonia tidak diukur dalam lingkup penelitian ini.
3. **Fungsi Aktuator:** Sistem kontrol otomatis terbatas pada pengoperasian satu unit pompa air DC untuk sirkulasi dan satu unit pemberi pakan otomatis yang digerakkan oleh motor servo. Penelitian ini tidak mencakup

pengembangan sistem kontrol untuk penambahan larutan pH *up* atau pH *down* secara otomatis.

4. **Antarmuka Pengguna:** Interaksi pengguna dengan sistem hanya dilakukan melalui satu platform, yaitu aplikasi berbasis web. Tidak ada pengembangan aplikasi seluler spesifik untuk platform Android atau iOS.
5. **Skala Prototipe:** Prototipe sistem akuaponik yang dibangun dan diuji adalah dalam skala laboratorium atau rumah tangga, bukan untuk penerapan skala industri atau komersial besar.

BAB II

STUDI LITERATUR

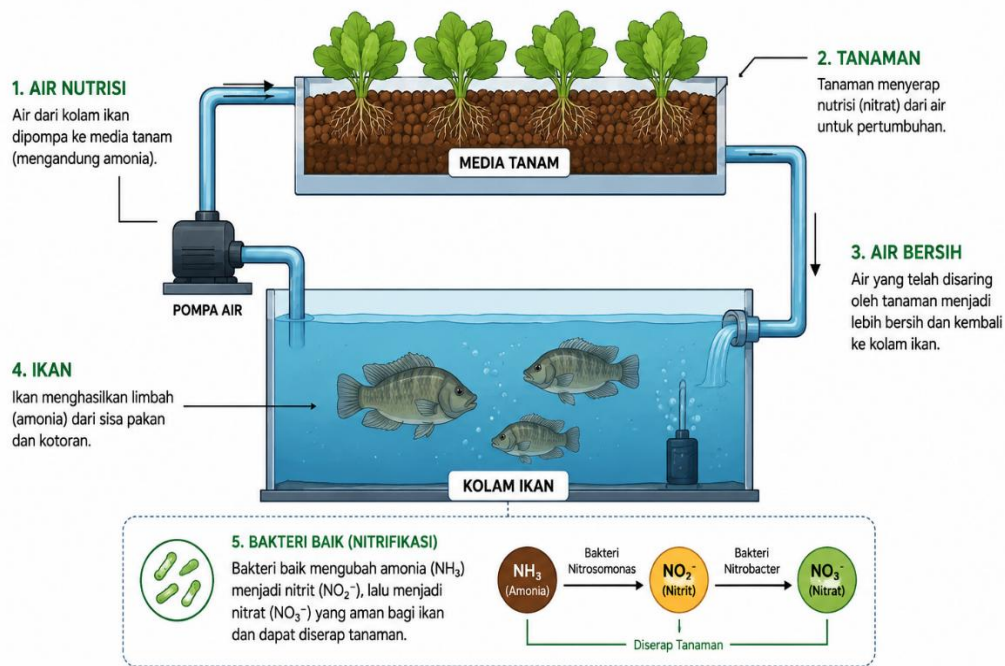
2.1 Akuaponik

2.1.1 Definisi dan Prinsip Kerja

Akuaponik adalah sebuah sistem produksi pangan inovatif yang mengintegrasikan dua teknologi budidaya yang berbeda, yaitu akuakultur (budidaya hewan air seperti ikan) dan hidroponik (budidaya tanaman dalam larutan nutrisi berbasis air tanpa menggunakan tanah). Prinsip dasar akuaponik adalah menciptakan sebuah ekosistem mini yang bersifat simbiosis mutualisme, di mana ketiga komponen utama—ikan, tanaman, dan bakteri—saling memberikan manfaat.

Proses ini berpusat pada siklus nitrogen. Ikan, setelah diberi pakan, akan mengeluarkan limbah dalam bentuk amonia (NH_3) melalui insang dan kotorannya. Dalam konsentrasi tinggi, amonia bersifat sangat beracun bagi ikan itu sendiri. Air dari kolam ikan yang kaya akan amonia ini kemudian dipompa ke media tanam (*grow bed*). Di dalam media tanam, yang juga berfungsi sebagai biofilter, hidup dua kelompok bakteri nitrifikasi yang sangat penting. Pertama, bakteri *Nitrosomonas* akan mengoksidasi amonia menjadi nitrit (NO_2^-). Nitrit juga masih bersifat racun bagi ikan. Kemudian, kelompok bakteri kedua, yaitu *Nitrobacter*, akan mengubah nitrit menjadi nitrat (NO_3^-).

Nitrat inilah yang merupakan bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman dan menjadi sumber nutrisi utama bagi pertumbuhannya. Tanaman menyerap nitrat dari air, sehingga secara efektif membersihkan air dari senyawa nitrogen yang berbahaya bagi ikan. Air yang telah "dibersihkan" oleh tanaman ini kemudian dialirkan kembali ke dalam kolam ikan, menciptakan sebuah siklus resirkulasi yang tertutup dan berkelanjutan.



Gambar 2.1. Arsitektur Sistem Akuaponik

2.1.2 Komponen Utama Sistem Akuaponik

Sebuah sistem akuaponik dasar umumnya terdiri dari beberapa komponen fisik utama, yaitu:

1. **Tangki Pemeliharaan Ikan:** Wadah untuk memelihara ikan. Ukuran dan bentuknya bervariasi tergantung pada skala sistem dan jenis ikan yang dipelihara.
2. **Media Tanam (Grow Bed):** Tempat tanaman tumbuh. Ini bisa berupa bak yang diisi dengan media tanam inert (seperti kerikil, arang, atau hydroton) atau berupa talang air.
3. **Pompa Air:** Komponen mekanis yang berfungsi untuk memompa air dari tangki ikan ke media tanam. Ini adalah komponen paling vital dalam sistem resirkulasi.
4. **Biofilter:** Area di mana bakteri nitrifikasi hidup dan berkembang biak. Pada sistem berbasis media (media-based system), media tanam itu sendiri sudah

berfungsi sebagai biofilter. Pada sistem lain, mungkin diperlukan unit biofilter terpisah.

5. **Perpipaan:** Sistem pipa yang menghubungkan semua komponen untuk memastikan aliran air berjalan lancar.

2.1.3 Jenis-jenis Sistem Akuaponik

Terdapat beberapa desain atau model sistem akuaponik yang populer, masing-masing dengan karakteristiknya sendiri:

- **Media-Based System (Sistem Berbasis Media):** Ini adalah jenis yang paling umum untuk skala kecil. Tanaman ditanam dalam wadah yang diisi media tanam. Air dari kolam ikan dialirkan untuk membanjiri media (teknik pasang surut atau flooding and drain) atau dialirkan secara kontinu. Media tanam berfungsi sebagai penyangga akar, filter mekanis, dan biofilter sekaligus.
- **Nutrient Film Technique (NFT):** Dalam sistem ini, tanaman ditempatkan di dalam lubang-lubang pada talang atau pipa horizontal. Aliran air yang tipis dan kaya nutrisi terus-menerus dialirkan melewati akar tanaman. Sistem ini sangat efisien dalam penggunaan air tetapi memerlukan filtrasi mekanis dan biofiltrasi terpisah sebelum air masuk ke talang.
- **Deep Water Culture (DWC) atau Raft System:** Tanaman ditempatkan pada sebuah rakit (biasanya dari styrofoam) yang mengapung di atas bak berisi air yang dalam. Akar tanaman terendam langsung di dalam air yang kaya nutrisi. Sistem ini memerlukan aerasi tambahan untuk menyuplai oksigen ke akar tanaman dan juga memerlukan unit filtrasi terpisah.

2.2 Parameter Kunci Kualitas Air: pH

2.2.1 Definisi pH

Nilai pH (Potensial Hidrogen) adalah sebuah parameter logaritmik yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan (alkalinitas) dari suatu larutan berbasis air. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14. Larutan dengan pH 7

dianggap netral. Larutan dengan pH di bawah 7 bersifat asam (karena konsentrasi ion hidrogen, H^+ , lebih tinggi), sedangkan larutan dengan pH di atas 7 bersifat basa (karena konsentrasi ion hidroksil, OH^- , lebih tinggi).

2.2.2 Peran Krusial pH dalam Akuaponik

Dalam ekosistem akuaponik, pH sering disebut sebagai "parameter master" karena pengaruhnya yang sangat luas dan fundamental terhadap semua organisme hidup di dalamnya: ikan, tanaman, dan bakteri. Menjaga pH dalam rentang yang optimal adalah kunci keberhasilan sistem akuaponik.

- **Pengaruh terhadap Tanaman:** Kemampuan akar tanaman untuk menyerap berbagai unsur hara sangat dipengaruhi oleh tingkat pH air. Jika pH terlalu tinggi (terlalu basa) atau terlalu rendah (terlalu asam), beberapa nutrisi esensial seperti zat besi, kalsium, dan magnesium menjadi tidak tersedia secara kimiawi bagi tanaman, meskipun nutrisi tersebut ada di dalam air. Akibatnya, tanaman akan menunjukkan gejala defisiensi nutrisi, seperti daun menguning, dan pertumbuhannya terhambat.
- **Pengaruh terhadap Ikan:** Ikan memiliki rentang toleransi pH tertentu. Fluktuasi pH yang ekstrim atau kondisi pH yang berada di luar rentang ideal dapat menyebabkan stres osmotik pada ikan, merusak lapisan lendir pelindungnya, mengganggu fungsi insang, dan membuatnya lebih rentan terhadap penyakit. Kondisi pH yang sangat asam atau basa dapat berakibat fatal dan menyebabkan kematian.
- **Pengaruh terhadap Bakteri Nitrifikasi:** Bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* yang bertanggung jawab atas proses nitrifikasi juga sangat sensitif terhadap pH. Kinerja mereka paling optimal pada rentang pH tertentu. Jika pH turun terlalu rendah (di bawah 6.0), aktivitas bakteri akan melambat secara signifikan. Jika proses nitrifikasi terhambat, amonia akan terakumulasi di dalam sistem, yang pada akhirnya akan meracuni ikan.

2.2.3 Rentang pH Ideal

Mengingat setiap organisme memiliki kebutuhan pH yang sedikit berbeda, sistem akuaponik harus dioperasikan pada rentang pH kompromi yang dapat menyeimbangkan kebutuhan ketiganya. Secara umum, rentang pH yang paling ideal untuk sebagian besar sistem akuaponik adalah sedikit asam hingga netral, yaitu antara 6.0 hingga 7.0. Pada rentang ini, ketersediaan nutrisi untuk tanaman cukup baik, ikan masih dapat hidup dengan nyaman, dan bakteri nitrifikasi dapat berfungsi secara efisien.

Tabel 2.1. Rentang pH Ideal untuk Komponen Sistem Akuaponik

Komponen Sistem	Rentang pH Ideal	Catatan Penting
Sistem Akuaponik Umum	6.0 - 7.5	Kompromi sistem untuk semua komponen
	6.8 - 7.2	Titik tengah yang sering direkomendasikan
	6.3 - 6.7	Optimal menurut beberapa sumber
Ikan Umum (Air Tawar)	5.5 - 7.5	Rentang yang dapat diterima untuk pertumbuhan
	6.5 - 9.0	Rentang toleransi umum budidaya ikan
Tilapia	6.5 - 9.0	Toleransi luas, pertumbuhan optimal
	6.5 - 8.5	Paling baik di air sedikit basa
Tanaman Umum	6.0 - 7.5	Sebagian besar tanaman akuaponik
Sayuran Berdaun	6.5 - 7.2	Netral hingga sedikit basa
Tanaman Berbuah Bakteri Nitrifikasi	5.8 - 6.5	Sedikit lebih asam, kebutuhan nutrisi tinggi
	7.2 - 8.2	Efisiensi optimal
	8.0 - 9.0	Rentang optimal lain yang disebutkan

2.3 Parameter Kunci Kualitas Air: Suhu

Bagian ini mengkaji suhu air sebagai parameter krusial yang memengaruhi kesehatan, produktivitas, dan stabilitas sistem akuaponik secara keseluruhan.

Berbeda dengan akuakultur atau hidroponik konvensional, akuaponik menuntut keseimbangan yang cermat, karena suhu memengaruhi ikan, tanaman, dan bakteri nitrifikasi vital secara simbiosis.

2.3.1 Pentingnya Suhu Air dalam Sistem Akuaponik

Suhu air diidentifikasi sebagai salah satu dari lima parameter kualitas air utama yang esensial untuk akuaponik, bersama dengan oksigen terlarut (DO), konsentrasi nitrogen total (amonia, nitrit, nitrat) dan pH. Peran fundamentalnya meluas untuk memengaruhi laju metabolisme dan fisiologi ikan secara keseluruhan, efisiensi pertumbuhan tanaman dan penyerapan nutrisi, serta aktivitas krusial bakteri nitrifikasi bermanfaat dalam biofilter.

Di luar dampak fisiologis langsung, suhu air secara kritis memengaruhi parameter kualitas air vital lainnya. Sebagai contoh, kelarutan oksigen terlarut (DO) dalam air menunjukkan hubungan terbalik dengan suhu; seiring kenaikan suhu, air menahan lebih sedikit DO, berpotensi menyebabkan stres oksigen pada ikan, terutama spesies air hangat yang mengalami peningkatan laju metabolisme dan permintaan oksigen pada suhu yang lebih tinggi. Selain itu, suhu, bersama dengan pH, merupakan faktor penentu dalam konsentrasi amonia tidak terionisasi (NH_3) yang sangat toksik yang berasal dari nitrogen amonia total (TAN); suhu air yang lebih tinggi umumnya meningkatkan proporsi amonia tidak terionisasi, sehingga meningkatkan toksisitasnya terhadap kehidupan akuatik.

Suhu bukan sekadar parameter terisolasi, melainkan modulator dinamis dari indikator kualitas air lainnya yang krusial. Pengaruh langsungnya terhadap kadar oksigen terlarut dan toksisitas amonia menunjukkan bahwa pengelolaan suhu yang tidak optimal dapat memicu efek berjenjang negatif di seluruh sistem. Misalnya, kenaikan suhu air dapat secara simultan mengurangi ketersediaan oksigen dan meningkatkan konsentrasi amonia toksik, yang secara signifikan meningkatkan tingkat stres fisiologis pada ikan. Stres ini, sebagaimana dicatat dalam penelitian, melemahkan sistem kekebalan tubuh ikan, membuat mereka lebih rentan terhadap penyakit. Kesehatan ikan yang terganggu atau kematian dapat mengganggu siklus

nutrisi, yang pada gilirannya berdampak langsung pada kesehatan tanaman dan produktivitas keseluruhan sistem akuaponik.

2.3.2 Rentang Suhu Ideal untuk Sistem Akuaponik Secara Keseluruhan

Menetapkan satu suhu air "ideal" untuk sistem akuaponik menyajikan tantangan unik karena persyaratan termal yang secara inheren bervariasi dari tiga komponen biologisnya: ikan, tanaman, dan bakteri nitrifikasi. Meskipun ada perbedaan ini, rentang kompromi umum yang mendukung fungsionalitas sebagian besar sistem akuaponik biasanya antara 17 dan 34°C (68 dan 86°F).

Dalam rentang menyeluruh ini, bakteri nitrifikasi, yang sangat diperlukan untuk mengubah amonia berbahaya dari limbah ikan menjadi nitrat yang dapat digunakan tanaman, menunjukkan energi dan efisiensi optimal. Aktivitas metabolisme mereka melambat secara signifikan ketika suhu turun di bawah 10°C (50°F), suatu kondisi yang dapat menyebabkan penumpukan amonia berbahaya dalam sistem.

Untuk komponen tanaman, banyak sayuran akuaponik umum, seperti selada, sawi Swiss, dan mentimun, menunjukkan penyerapan nutrisi dan efisiensi fotosintetik optimal dalam kisaran suhu 21-24°C (70-75°F). Sayuran lain, termasuk okra dan basil, mungkin lebih menyukai rentang yang sedikit lebih luas yaitu 17-30°C. Spesies ikan, terutama varietas tropis yang umum digunakan dalam akuaponik, umumnya tumbuh subur dalam 22-32°C (71-89°F).

Tabel 2.2. Rentang Suhu Air Ideal untuk Komponen Sistem Akuaponik

Komponen Sistem	Rentang Suhu Ideal	Catatan Penting
Sistem Akuaponik Umum		
Sistem Akuaponik Umum	17–34°C / 68–86°F	Rentang kompromi untuk mendukung semua komponen
	18–30°C / 64–86°F	Rentang umum yang optimal

Komponen Sistem	Rentang Suhu Ideal	Catatan Penting
Bakteri Nitrifikasi	17–34°C / 68–86°F	Efisiensi optimal; aktivitas menurun drastis di bawah 10°C
Tanaman		
Umum (sebagian besar sayuran)	18–30°C / 64–86°F	Pertumbuhan dan penyerapan nutrisi optimal
Sayuran Berdaun (selada, sawi, mentimun)	21–24°C / 70–75°F	Suhu di atas 26°C dapat menyebabkan bolting
Sayuran Lain (okra, basil)	17–30°C	-
Tanaman Berbuah	21–27°C / 70–80°F	Membutuhkan suhu air yang lebih hangat
Ikan		
Umum (Spesies Air Hangat)	22–32°C / 71–89°F	Mendukung sistem kekebalan tubuh dan pertumbuhan optimal
Tilapia	18–30°C / 65–85°F	Optimal untuk pertumbuhan: 27–29°C; sering 22–23°C

2.3.3 Dampak Fluktuasi Suhu Air pada Sistem Akuaponik

Menjaga suhu air yang stabil dalam rentang ideal yang ditetapkan sangat penting untuk kesehatan, produktivitas, dan ketahanan sistem akuaponik secara keseluruhan. Fluktuasi, baik yang ditandai dengan peningkatan atau penurunan mendadak, dapat memiliki efek merugikan yang parah dan berjenjang pada ketiga komponen biologis: ikan, tanaman, dan bakteri bermanfaat.

Konsekuensi Suhu Air Tinggi:

- **Pada Ikan:** Suhu yang tinggi menyebabkan peningkatan laju metabolisme ikan, pernapasan, dan permintaan oksigen, sementara secara bersamaan mengurangi kelarutan oksigen terlarut dalam air. Ini menciptakan lingkungan yang sangat stres dan kekurangan oksigen, yang bermanifestasi pada ikan yang menjadi lesu, kehilangan nafsu makan, menunjukkan perilaku bersembunyi yang meningkat, dan menunjukkan peningkatan

kerentanan terhadap penyakit. Dalam skenario akut, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kematian cepat.

- **Pada Tanaman:** Suhu tinggi mengganggu kemampuan tanaman untuk menyerap air, menyebabkan layu dan hilangnya kekakuan pada daun. Tanaman di bawah tekanan panas mengalihkan energi dari proses reproduksi seperti perkembangan buah dan bunga, yang mengakibatkan penurunan hasil dan panen yang lebih kecil. Selain itu, air panas dapat secara langsung merusak akar tanaman, meningkatkan kerentanannya terhadap busuk akar. Untuk sayuran berdaun hijau, suhu di atas 26°C dapat memicu bolting (pembungaan dan pembentukan biji prematur), membuatnya pahit dan tidak layak jual.
- **Pada Bakteri Nitrifikasi:** Meskipun bakteri bermanfaat umumnya memiliki toleransi suhu yang relatif luas (17-34°C), suhu tinggi ekstrem dapat secara signifikan memperlambat aktivitas metabolisme mereka. Hal ini menyebabkan konversi limbah ikan beracun (amonia) menjadi nutrisi yang dapat digunakan tanaman (nitrat) menjadi kurang efisien, berpotensi menciptakan ketidakseimbangan kritis dalam siklus nitrogen sistem.

Konsekuensi Suhu Air Rendah:

- **Pada Ikan:** Air dingin secara mendalam memperlambat metabolisme ikan, membuat mereka lesu dan secara nyata kurang aktif. Kondisi fisiologis yang melemah ini secara nyata meningkatkan kerentanan mereka terhadap penyakit dan komplikasi kesehatan lainnya. Nafsu makan mereka berkurang drastis, dan pemberian makan dapat berhenti sepenuhnya di bawah ambang batas tertentu (misalnya, di bawah 8°C untuk ikan mas).
- **Pada Tanaman:** Ketika suhu air turun di bawah rentang optimalnya, proses metabolisme tanaman terhambat parah, yang mengakibatkan pertumbuhan terhambat, ukuran tanaman keseluruhan yang lebih kecil, dan perkembangan yang tertunda. Air dingin juga mengganggu kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi secara efisien dari kolom air, berpotensi menyebabkan defisiensi bahkan jika nutrisi yang memadai tersedia.

- **Pada Bakteri Nitrifikasi:** Aktivitas bakteri nitrifikasi berkurang secara dramatis di bawah 10°C (50°F), dan dapat berhenti hampir sepenuhnya di bawah 4°C (39°F). Pengurangan drastis dalam efisiensi bakteri ini menyebabkan akumulasi cepat amonia toksik dalam air, menimbulkan ancaman serius dan langsung terhadap kesehatan dan kelangsungan hidup ikan dan tanaman dalam sistem.

2.4 Teknologi Internet of Things (IoT) untuk Pertanian

2.4.1 Definisi dan Arsitektur IoT

Internet of Things (IoT) merujuk pada sebuah konsep di mana objek atau perangkat fisik sehari-hari dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya untuk dapat terhubung dan bertukar data dengan perangkat dan sistem lain melalui internet. Arsitektur IoT secara umum dapat dibagi menjadi empat lapisan fungsional:

1. **Perception Layer (Lapisan Persepsi/Sensorik):** Ini adalah lapisan fisik yang berinteraksi langsung dengan lingkungan. Terdiri dari sensor (misalnya, sensor pH, suhu, kelembaban) yang mengumpulkan data dari dunia nyata dan aktuator (misalnya, pompa, motor, katup) yang melakukan tindakan fisik.
2. **Network Layer (Lapisan Jaringan/Konektivitas):** Lapisan ini bertanggung jawab untuk mentransmisikan data yang dikumpulkan oleh lapisan persepsi ke sistem pemrosesan. Teknologi yang digunakan meliputi Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, NB-IoT, dan protokol komunikasi seperti MQTT, CoAP, atau HTTP.
3. **Processing Layer (Lapisan Pemrosesan/Platform):** Seringkali berada di cloud atau server lokal. Lapisan ini bertugas untuk menyimpan, memproses, dan menganalisis data dalam jumlah besar yang diterima dari lapisan jaringan. Ini melibatkan database, mesin analitik, dan logika bisnis.
4. **Application Layer (Lapisan Aplikasi):** Ini adalah lapisan antarmuka yang berinteraksi dengan pengguna akhir. Lapisan ini menyajikan data yang telah

diproses dalam format yang mudah dipahami (misalnya, dasbor, grafik, notifikasi) dan memungkinkan pengguna untuk mengontrol sistem dari jarak jauh.

2.4.2 Penerapan IoT dalam Akuaponik (Studi Terdahulu)

Penerapan IoT telah menunjukkan potensi besar dalam memodernisasi dan mengoptimalkan sistem akuaponik. Berbagai penelitian sebelumnya telah berhasil mengimplementasikan solusi IoT untuk mengatasi tantangan operasional. Beberapa contoh meliputi:

- **Pemantauan Kualitas Air:** Banyak peneliti telah mengembangkan sistem untuk memantau parameter air secara real-time, seperti pH, TDS, suhu, dan ketinggian air, menggunakan berbagai sensor yang terhubung ke mikrokontroler seperti Arduino atau berbagai varian ESP (ESP8266, ESP32, ESP32-C3).
- **Kontrol Otomatis:** Sistem kontrol telah dirancang untuk mengotomatiskan berbagai tugas. Contohnya adalah sistem yang secara otomatis menambahkan larutan pH up/down ketika pH keluar dari rentang ideal, dan sistem pemberi pakan otomatis yang dapat dijadwalkan atau dikontrol dari jarak jauh.
- **Antarmuka dan Notifikasi:** Untuk pemantauan jarak jauh, berbagai platform telah digunakan. Aplikasi seluler seperti Blynk sering digunakan karena kemudahan integrasinya. Platform lain seperti Telegram juga populer untuk mengirimkan notifikasi atau peringatan ketika parameter sistem berada di luar batas aman. Beberapa penelitian yang lebih maju bahkan mengembangkan aplikasi web atau seluler kustom untuk visualisasi dan kontrol yang lebih komprehensif.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid

2.5.1 Prinsip Kerja PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bekerja berdasarkan efek fotovoltaiik, yaitu fenomena di mana material semikonduktor tertentu (biasanya silikon) dapat menghasilkan arus listrik ketika terkena paparan cahaya matahari. Sel surya (solar cell) adalah unit dasar yang melakukan konversi ini. Beberapa sel surya dirangkai bersama untuk membentuk sebuah modul atau panel surya untuk menghasilkan daya yang lebih besar. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya adalah listrik arus searah (DC).

2.5.2 Komponen Sistem PLTS Off-Grid

Sistem PLTS off-grid adalah sistem yang sepenuhnya mandiri dan tidak terhubung ke jaringan listrik utama (PLN). Sistem ini sangat cocok untuk aplikasi di lokasi terpencil atau untuk sistem yang membutuhkan kemandirian energi total, seperti yang diusulkan dalam penelitian ini. Komponen utamanya adalah:

- **Panel Surya:** Komponen yang bertugas menangkap energi dari sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik DC.
- **Solar Charge Controller (SCC):** Perangkat elektronik cerdas yang ditempatkan di antara panel surya dan baterai. Fungsinya adalah untuk mengatur arus dan tegangan dari panel surya yang masuk ke baterai. SCC mencegah pengisian daya berlebih (overcharging) yang dapat merusak baterai dan juga mencegah pengosongan daya berlebih (deep discharging) dengan memutus beban jika tegangan baterai terlalu rendah.
- **Baterai (Aki):** Komponen penyimpan energi. Baterai menyimpan kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya pada siang hari untuk digunakan pada malam hari atau saat cuaca mendung ketika panel surya tidak menghasilkan listrik.
- **Inverter (Opsional):** Perangkat yang mengubah listrik DC dari baterai menjadi listrik arus bolak-balik (AC 220V). Untuk sistem dalam penelitian ini, yang komponen utamanya (pompa DC, mikrokontroler) dapat

beroperasi dengan listrik DC, penggunaan inverter tidak diperlukan. Hal ini penting karena menghilangkan inverter dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan dengan mengurangi kerugian konversi daya.

2.5.3 Studi Terdahulu Pemanfaatan PLTS di Sektor Perikanan

Pemanfaatan PLTS di sektor akuakultur dan perikanan bukanlah hal baru dan kelayakannya telah terbukti dalam berbagai aplikasi. Penelitian-penelitian sebelumnya telah berhasil menerapkan PLTS untuk:

- Memberi daya pada aerator atau kincir air di tambak udang dan kolam ikan untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut.
- Mengoperasikan pompa air untuk sirkulasi atau pengisian kolam.
- Menyediakan penerangan pada bagan tancap di laut untuk menarik ikan pada malam hari, menggantikan lampu petromaks yang boros bahan bakar.
- Memberi daya pada sistem pemberi pakan ikan otomatis.

Studi-studi ini secara kolektif menunjukkan bahwa PLTS adalah solusi energi yang andal, ramah lingkungan, dan ekonomis dalam jangka panjang untuk berbagai kebutuhan listrik dalam budidaya perikanan.

2.6 Penelitian Terdahulu dan Kebaruan Penelitian

2.6.1 Analisis Kritis Penelitian Terdahulu

Untuk memposisikan penelitian ini dalam lanskap ilmiah yang ada, dilakukan analisis kritis terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan. Analisis ini disajikan dalam bentuk tabel perbandingan untuk menyoroti kontribusi, metodologi, serta keterbatasan atau celah yang ada pada setiap penelitian. Tabel ini berfungsi sebagai alat argumentasi visual yang menunjukkan secara sistematis area mana yang telah banyak dieksplorasi dan area mana yang masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, sehingga justifikasi untuk penelitian yang diusulkan menjadi lebih kuat dan terukur.

Tabel 2.3. Perbandingan Penelitian Terdahulu yang Relevan

Peneliti (Tahun)	Fokus Penelitian	Sensor	Aktuator	Sistem Kontrol & Sumber Daya
Danih & Kristianto (2021)	Pengendalian kualitas air pakan ikan	pH, Turbidity, Suhu (DHT11)	Relay (pompa air), Servo (pakan)	Kontrol ambang batas; Listrik PLN
Widodo, et al. (2021)	Monitoring kualitas air	Suhu (DS18B20), pH, TDS, Kekeruhan	Tidak ada (hanya monitoring)	Hanya monitoring; Listrik PLN
Umar, et al. (2024)	Kontrol & monitoring pH, suhu, TDS	pH, Suhu (DS18B20), TDS	Pompa nutrisi, Valve	Rule-based & manual; Listrik PLN
Al-Absi, et al. (2024)	Manajemen kualitas air dengan PID	pH, Suhu (LM35), Level Air, TDS	Pompa DC, Solenoid Valve, Heater, Feeder	Kontrol PID; Asumsi PLN
Jaelani, et al. (2023)	Otomasi & efisiensi energi surya	Tidak dispesifikasi	Pompa air	Otomasi Arduino sederhana; Panel Surya 200Wp
Goddek, et al. (2021)	Eksplorasi desain akuaponik di Jakarta	Virtual/Model	Virtual/Model	Analisis model; Studi pemodelan
Penelitian yang Diusulkan (2025)	Integrasi holistik: otomasi pompa & pakan, manajemen daya cerdas (deep sleep & timer), kemandirian energi penuh	pH (pH E-201-C), Suhu (DS18B20), RTC (DS3231)	Pompa DC (Relay), Pemberi pakan (Servo)	Otomasi berbasis aturan & jadwal dengan optimasi deep sleep; PLTS off-grid

2.6.2 Kebaruan Penelitian (Research Novelty)

Berdasarkan analisis mendalam terhadap celah-celah yang teridentifikasi pada penelitian-penelitian terdahulu sebagaimana disajikan pada Tabel 2.3, kebaruan (novelty) dari penelitian yang diusulkan ini terletak pada penggabungan menyeluruh dari tiga bidang teknologi yang berbeda (pertanian cerdas, IoT, dan energi terbarukan) menjadi satu prototipe fisik yang berfungsi penuh dan saling terhubung. Kontribusi utama penelitian ini dapat dirinci menjadi tiga pilar kebaruan:

1. **Otomasi Komprehensif dan Terpadu:** Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung berfokus pada satu aspek saja, seperti monitoring pasif atau kontrol parameter air yang terbatas, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem otomasi yang komprehensif. Sistem ini tidak hanya memantau parameter lingkungan (pH dan suhu), tetapi juga mengotomatiskan dua tugas operasional paling krusial: sirkulasi air (pompa) dan pemberian pakan terjadwal (feeder). Integrasi kedua fungsi ini menciptakan sebuah sistem yang jauh lebih otonom dan efisien secara operasional.
2. **Manajemen Energi Cerdas dan Kemandirian Penuh:** Mayoritas penelitian sebelumnya masih bergantung pada pasokan listrik dari jaringan PLN. Meskipun ada penelitian yang telah menggunakan tenaga surya, penelitian ini melangkah lebih jauh. Sistem yang diusulkan tidak hanya sekadar ditenagai oleh panel surya, tetapi dirancang dengan pendekatan manajemen daya aktif dari tingkat dasar. Pemanfaatan mode deep sleep pada mikrokontroler ESP32-C3 berarsitektur RISC-V yang memiliki konsumsi daya rendah, serta sistem timer pada pompa secara sistematis untuk meminimalkan konsumsi daya saat siaga, merupakan pendekatan rekayasa yang lebih canggih. Hal ini bertujuan untuk mencapai kemandirian energi yang sesungguhnya dengan efisiensi setinggi mungkin, yang memungkinkan penggunaan komponen daya (panel dan baterai) yang lebih kecil dan lebih terjangkau.

3. **Platform Manajemen Terpusat dan Fungsional:** Penelitian ini menyatukan seluruh fungsi sistem—mulai dari monitoring data real-time, visualisasi data historis untuk analisis tren, hingga kemampuan kontrol manual—ke dalam satu platform aplikasi web yang kohesif dan mudah digunakan. Ini memberikan pengalaman manajemen yang lengkap dan terpusat bagi pengguna, sebuah aspek yang seringkali tidak diperhatikan dalam penelitian lain yang lebih berorientasi pada perangkat keras atau pemodelan teoretis.

Secara ringkas, kebaruan penelitian ini adalah penggabungan dan pengujian sebuah prototipe sistem akuaponik yang menghubungkan perangkat fisik dengan kontrol digital, yang sepenuhnya mandiri energi, dapat dikelola dari jarak jauh melalui platform web, dan dirancang secara fundamental dengan pendekatan efisiensi daya dari tingkat mikrokontroler hingga tingkat sistem secara keseluruhan.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam proyek ini adalah **Penelitian dan Pengembangan** atau *Research and Development (R&D)*. Metode ini dipilih karena tujuan utama penelitian bukan hanya untuk menemukan pengetahuan baru atau menguji hipotesis, melainkan untuk menghasilkan sebuah **produk teknologi tertentu** (dalam hal ini, prototipe sistem akuaponik cerdas) dan kemudian menguji keefektifan serta kelayakan produk tersebut dalam konteks operasional yang sesungguhnya. Metode R&D sangat relevan untuk proyek-proyek rekayasa dan pengembangan sistem yang berorientasi pada penciptaan solusi praktis untuk masalah nyata.

Model R&D yang akan diadaptasi dalam penelitian ini adalah model pengembangan **4-D (Four-D Model)** yang dikemukakan oleh *Thiagarajan, Semmel, dan Semmel*. Model ini terdiri dari empat tahapan utama: **Define** (Pendefinisian), **Design** (Perancangan), **Develop** (Pengembangan), dan **Disseminate** (Penyebaran). Untuk konteks penelitian pengembangan produk teknologi tunggal seperti tesis ini, tahap *Disseminate* akan diinterpretasikan sebagai tahap Pengujian dan Evaluasi produk akhir. Berikut adalah penjabaran langkah-langkah yang akan dilakukan:

1. **Tahap 1: Define (Analisis dan Pengumpulan Informasi).** Pada tahap ini, dilakukan analisis untuk menetapkan fondasi dan kebutuhan proyek. Kegiatannya meliputi studi literatur yang mendalam untuk memahami teori dasar akuaponik, IoT, dan PLTS; analisis kebutuhan fungsional dan non-fungsional sistem; serta identifikasi dan pemilihan komponen perangkat keras dan lunak yang paling sesuai berdasarkan studi perbandingan dan penelitian terdahulu.

2. **Tahap 2: Design (Perancangan Produk).** Berdasarkan hasil dari tahap Define, tahap ini berfokus pada perancangan detail dari sistem. Ini mencakup perancangan arsitektur sistem secara keseluruhan, pembuatan skematik rangkaian elektronik perangkat keras, perancangan alur logika perangkat lunak, pemodelan sistem menggunakan Unified Modeling Language (UML) seperti Use Case Diagram dan Flowchart, serta perancangan antarmuka pengguna (UI) dan pengalaman pengguna (UX) untuk aplikasi web.
3. **Tahap 3: Develop (Pengembangan dan Validasi Produk).** Tahap ini adalah tahap realisasi dari desain yang telah dibuat. Kegiatannya meliputi perakitan fisik perangkat keras, pengkabelan, dan penyolderan. Di sisi perangkat lunak, kegiatan meliputi penulisan kode program (coding) untuk firmware mikrokontroler, backend server, dan frontend aplikasi web. Setelah draf produk awal selesai, akan dilakukan validasi internal (uji coba mandiri) untuk memastikan setiap modul berfungsi sesuai rancangan.
4. **Tahap 4: Pengujian dan Evaluasi.** Setelah prototipe terintegrasi dan berjalan, tahap pengujian komprehensif akan dilakukan. Ini mencakup pengujian fungsional (black-box) untuk memastikan semua fitur bekerja sesuai spesifikasi, pengujian integrasi untuk memastikan semua komponen (perangkat keras dan lunak) dapat berkomunikasi dengan baik, dan pengujian kinerja untuk mengukur metrik kuantitatif seperti akurasi sensor, waktu respons sistem, dan keandalan operasional selama periode waktu tertentu (misalnya, 7 hari). Hasil dari evaluasi ini akan menjadi dasar untuk penarikan kesimpulan mengenai keberhasilan proyek.

3.2 Metode Pengumpulan Data

Untuk mendukung analisis dan evaluasi sistem, data akan dikumpulkan melalui dua metode utama:

1. **Studi Literatur:** Metode ini digunakan untuk mengumpulkan data sekunder yang menjadi dasar teoretis dan teknis penelitian. Data dikumpulkan dari

berbagai sumber seperti jurnal ilmiah internasional dan nasional, buku teks, prosiding konferensi, datasheet resmi dari produsen komponen elektronik, dan artikel teknis dari sumber terpercaya. Data ini digunakan untuk menyusun Bab II dan menjadi landasan dalam pengambilan keputusan pada tahap perancangan sistem.

2. **Eksperimen dan Pengujian Prototipe:** Metode ini digunakan untuk mengumpulkan data primer kuantitatif langsung dari prototipe yang sedang beroperasi. Data yang akan dikumpulkan meliputi:

- Data Pembacaan Sensor: Nilai tegangan analog yang dikeluarkan oleh modul sensor suhu / pH dan nilai pH hasil konversi. Data ini akan dibandingkan dengan alat ukur suhu / pH meter standar untuk menguji akurasi.
- Data Status Aktuator: Log waktu kapan pompa air dan pemberi pakan diaktifkan dan dinonaktifkan oleh sistem.
- Data Operasional Sistem: Log konektivitas perangkat ke jaringan, data yang ditampilkan di aplikasi web, dan catatan setiap kegagalan atau error yang terjadi selama periode pengujian.
- Data ini akan dianalisis untuk mengevaluasi kinerja, keandalan, dan fungsionalitas sistem secara keseluruhan.

3.3 Perancangan Sistem

3.3.1 Arsitektur Sistem Keseluruhan

Arsitektur sistem dirancang dengan pendekatan berlapis (layered architecture) yang umum digunakan dalam sistem IoT untuk memastikan modularitas, skalabilitas, dan keandalan. Arsitektur ini memisahkan antara perangkat fisik, logika pemrosesan, dan antarmuka pengguna.

1. **Perangkat Fisik (Edge Layer):** Lapisan ini terdiri dari semua komponen fisik di lokasi akuaponik. Sensor pH model E-201-C bertugas membaca kondisi keasaman air. Data analog dari sensor ini diterima dan diproses oleh

mikrokontroler ESP32-C3. ESP32-C3 tidak hanya mengonversi sinyal analog ke digital, tetapi juga menjalankan logika kontrol lokal untuk mengaktifkan pompa air DC (melalui modul relay) dan pemberi pakan otomatis (digerakkan motor servo berdasarkan jadwal dari modul RTC). Seluruh lapisan ini ditenagai oleh sistem PLTS Off-Grid (panel surya, SCC, baterai) yang membuatnya mandiri energi.

2. **Konektivitas (Network Layer):** Mikrokontroler ESP32-C3, dengan modul Wi-Fi bawaannya, berfungsi sebagai klien MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). ESP32-C3 akan mempublikasikan (publish) data telemetri (nilai pH, status pompa, status pakan) secara periodik ke sebuah topik spesifik di broker MQTT. Penggunaan protokol MQTT dipilih karena sangat ringan (lightweight), efisien dalam penggunaan bandwidth, dan andal untuk koneksi yang mungkin tidak stabil, menjadikannya standar industri untuk komunikasi IoT.

3. **Backend (Processing Layer):** Di sisi server, terdapat tiga komponen utama:

- **Broker MQTT:** Sebuah server (misalnya, Mosquitto) yang bertugas menerima semua pesan dari perangkat IoT dan mendistribusikannya ke klien yang berlangganan (subscribe).
- **Layanan Backend:** Sebuah aplikasi server (misalnya, ditulis menggunakan Node.js atau Python) yang berlangganan topik telemetri dari broker. Aplikasi ini bertugas memproses data yang masuk, menyimpannya ke dalam database, dan menyediakan API (Application Programming Interface) untuk komunikasi dengan frontend.
- **Database:** Sistem akan menggunakan database relasional MySQL untuk menyimpan seluruh data, baik data terstruktur (informasi pengguna, jadwal pakan, konfigurasi sistem) maupun data sensor historis (log nilai pH dan suhu beserta waktunya). Penggunaan satu jenis database dipilih untuk menyederhanakan arsitektur, memudahkan pemeliharaan, dan mengurangi kompleksitas operasional pada skala prototipe.

4. **Frontend (Application Layer):** Ini adalah antarmuka yang dilihat oleh pengguna, berupa aplikasi web yang dibangun menggunakan framework modern seperti React atau Vue.js. Aplikasi web ini akan:

- Mengambil data dari backend melalui API untuk menampilkan visualisasi data pH secara real-time dan dalam bentuk grafik historis.
- Menampilkan status terkini dari pompa dan pakan.
- Mengirimkan perintah kontrol dari pengguna (misalnya, menekan tombol "Hidupkan Pompa Manual") ke backend. Backend kemudian akan mempublikasikan pesan perintah tersebut ke topik kontrol di broker MQTT, yang selanjutnya akan diterima dan dieksekusi oleh ESP32-C3.

Arsitektur ini memastikan bahwa perangkat keras di lapangan (edge) dapat terus menjalankan fungsi kontrol dasarnya bahkan jika koneksi internet terputus sementara (misalnya, pakan tetap diberikan sesuai jadwal RTC), sementara data dan kontrol cangguh dikelola melalui server.

3.3.2 Perancangan Perangkat Keras

Pemilihan komponen perangkat keras dilakukan dengan mempertimbangkan kinerja, konsumsi daya, ketersediaan, dan biaya.

Mikrokontroler: ESP32-C3

Pemilihan ESP32-C3 sebagai otak sistem didasarkan pada keunggulannya yang signifikan dibandingkan alternatif populer seperti Arduino Uno maupun varian ESP32 generasi sebelumnya untuk aplikasi IoT bertenaga baterai dan surya. Justifikasinya adalah:

1. **Konektivitas Nirkabel Terintegrasi:** ESP32-C3 sudah memiliki modul Wi-Fi 802.11 b/g/n (2,4 GHz) dan Bluetooth 5 (LE) bawaan, menghilangkan kebutuhan akan shield atau modul eksternal yang menambah kompleksitas, biaya, dan konsumsi daya.
2. **Arsitektur RISC-V yang Hemat Daya:** ESP32-C3 menggunakan CPU single-core 32-bit RISC-V berkecepatan hingga 160 MHz. Walaupun secara

nominal lebih sederhana dibandingkan ESP32 dual-core, arsitektur RISC-V ini dirancang dengan efisiensi daya sebagai prioritas. Untuk beban kerja akuaponik (pembacaan sensor periodik, publikasi MQTT, dan kontrol aktuator), kinerja single-core 160 MHz sudah lebih dari memadai dan konsumsi dayanya secara signifikan lebih rendah, sangat sesuai dengan kebutuhan sistem off-grid bertenaga surya. Jika dibandingkan dengan ATmega328P single-core 16 MHz pada Arduino Uno, ESP32-C3 tetap memiliki kinerja yang jauh lebih tinggi.

3. **Memori yang Memadai:** ESP32-C3 dilengkapi SRAM sebesar 400 KB dan ROM 384 KB, jauh melampaui 2 KB SRAM pada Arduino Uno. Memori ini krusial untuk menjalankan tumpukan protokol jaringan (TCP/IP, Wi-Fi, MQTT) dan kode aplikasi yang berukuran sedang.
4. **Efisiensi Daya Tinggi:** ESP32-C3 beroperasi pada tegangan logika 3,3V dan mendukung beberapa mode hemat daya, termasuk light sleep dan deep sleep dengan konsumsi arus hanya sekitar 5 μ A pada mode deep sleep. Karakteristik ini menjadikannya pilihan ideal untuk sistem yang ditenagai oleh baterai dan panel surya.
5. **Keamanan Tertanam:** ESP32-C3 menyediakan fitur keamanan tingkat lanjut yaitu enkripsi flash, secure boot, dan akselerator kriptografi perangkat keras. Fitur ini mendukung implementasi MQTT over TLS secara native dengan overhead minimum.

Sensor pH: Model E-201-C

1. **Spesifikasi Teknis:** Sensor ini memiliki rentang deteksi 0–14 pH, beroperasi pada tegangan 5V, dan menghasilkan sinyal output analog yang proporsional dengan nilai pH. Sensor ini terhubung ke mikrokontroler melalui konektor BNC pada sebuah modul pengkondisi sinyal.
2. **Prosedur Kalibrasi:** Untuk memastikan akurasi, kalibrasi adalah langkah wajib. Prosedur kalibrasi dua titik akan dilakukan: (1) Probe sensor dicelupkan ke dalam larutan buffer standar pertama (misalnya, pH 4.01), dan nilai tegangan analognya dicatat. (2) Probe dibersihkan dan dicelupkan

ke larutan buffer standar kedua (misalnya, pH 6.86 atau 9.18), dan nilai tegangannya dicatat. Dari dua titik data ini (tegangan vs. pH), sebuah persamaan garis lurus ($y=mx+c$) dapat diturunkan untuk memetakan setiap nilai tegangan yang dibaca oleh mikrokontroler ke nilai pH yang akurat.

Aktuator dan Modul Pendukung

1. **Pompa Air:** Sebuah pompa air DC 12V berdaya 22 W akan digunakan untuk menjamin laju sirkulasi air yang memadai pada sistem akuaponik. Pompa ini akan dikendalikan oleh sebuah modul relay 1-channel. Pin sinyal relay dihubungkan ke salah satu pin GPIO ESP32-C3. Ketika pin GPIO diberi sinyal HIGH, relay akan menutup sirkuit dan menyalakan pompa 12V.
2. **Pemberi Pakan Otomatis:** Mekanisme akan dibuat menggunakan motor servo SG90. Servo akan dihubungkan ke pin GPIO pada ESP32-C3 yang mendukung output PWM melalui peripheral LEDC, dan diprogram untuk berputar pada sudut tertentu (misalnya, 90 derajat) untuk membuka katup wadah pakan, dan kemudian kembali ke posisi semula untuk menutupnya.
3. **Penjadwalan Akurat:** Untuk memastikan jadwal pakan tidak terganggu oleh reset atau kehilangan daya sesaat pada mikrokontroler, sebuah modul Real-Time Clock (RTC) DS3231 akan digunakan. Modul ini memiliki baterai cadangan sendiri dan berkomunikasi dengan ESP32-C3 melalui antarmuka I2C, menyediakan informasi waktu yang sangat akurat dan persisten.

Sistem Catu Daya Tenaga Surya (PLTS)

Perhitungan kebutuhan daya adalah langkah kritis untuk merancang sistem PLTS yang andal. Perhitungan ini didasarkan pada spesifikasi daya nominal masing-masing komponen sistem, pola operasionalnya (duty cycle), dan parameter iklim lokasi pemasangan.

1. Perhitungan Beban Energi Harian (Watt-jam):

- **Beban Pompa Air:** Pompa DC 12V dengan daya nominal 22 W diatur untuk menyala selama 30 menit dalam setiap satu jam (duty cycle 50%). Dengan demikian, total waktu operasi pompa adalah $0,5 \text{ jam} \times 24$

jam/hari = 12 jam/hari. Energi yang dikonsumsi pompa adalah $22 \text{ W} \times 12 \text{ jam} = 264 \text{ Wh/hari}$.

- **Beban Sistem Kontrol:** Sistem kontrol terdiri dari ESP32-C3, sensor pH E-201-C, sensor suhu DS18B20, modul RTC DS3231, modul relay, dan motor servo SG90. Penerapan mode light sleep pada ESP32-C3 (siklus 5 detik aktif – 25 detik tidur) menghasilkan arus rata-rata sekitar 16 mA. Ditambah arus sensor (sekitar 7 mA), servo idle (6 mA), serta arus rata-rata coil relay (35 mA pada duty 50%), total daya pada sisi keluaran konverter LM2596 adalah sekitar 0,28 W. Dengan efisiensi konverter LM2596 sebesar 85%, daya yang ditarik dari sisi 12V menjadi sekitar 0,33 W, sehingga energi harian sistem kontrol adalah $0,33 \text{ W} \times 24 \text{ jam} \approx 8 \text{ Wh/hari}$.
- **Total Kebutuhan Energi Harian:** $264 \text{ Wh} + 8 \text{ Wh} = 272 \text{ Wh/hari}$.

2. Perhitungan Ukuran Panel Surya (Watt-peak):

- Dengan asumsi Puncak Jam Matahari (Peak Sun Hour – PSH) rata-rata di Indonesia adalah 4 jam/hari.
- Daya panel minimum yang dibutuhkan adalah $\text{Total Energi Harian} / \text{PSH} = 272 \text{ Wh} / 4 \text{ h} = 68 \text{ Wp}$.
- Untuk mengantisipasi kerugian sistem secara menyeluruh (efisiensi pengisian baterai, kerugian SCC, kerugian kabel, dan penurunan efisiensi panel akibat suhu panel yang tinggi di iklim tropis) sebesar sekitar 30%, daya panel yang direkomendasikan adalah $68 \text{ Wp} \times 1,30 = 88,4 \text{ Wp}$.
- Maka, akan dipilih panel surya dengan kapasitas komersial terdekat di atas nilai tersebut, yaitu panel surya 100 Wp.

3. Perhitungan Kapasitas Baterai (Ampere-jam):

- Kebutuhan penyimpanan energi per hari adalah 272 Wh.
- Untuk menyediakan cadangan energi selama 2 hari (hari otonomi) sebagai antisipasi cuaca mendung berturut-turut, total energi yang harus disimpan adalah $272 \text{ Wh/hari} \times 2 \text{ hari} = 544 \text{ Wh}$.

- Kapasitas baterai dalam Ampere-jam (Ah) dihitung dengan rumus:

$$\text{Kapasitas (Ah)} = \text{Total Energi Simpanan (Wh)} / \text{Tegangan Baterai (V)} = 544 \text{ Wh} / 12 \text{ V} \approx 45,3 \text{ Ah}.$$
- Untuk menjaga keawetan baterai jenis VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid), direkomendasikan Depth of Discharge (DoD) tidak lebih dari 50%. Artinya, kapasitas total baterai yang dibutuhkan adalah Kapasitas Kalkulasi / DoD = $45,3 \text{ Ah} / 0,5 \approx 90,6 \text{ Ah}$.
- Maka, akan dipilih baterai VRLA 12V dengan kapasitas komersial terdekat di atas nilai tersebut, yaitu 100 Ah.

4. Perhitungan Kapasitas Solar Charge Controller (SCC):

- Arus pengisian maksimum dari panel surya adalah Daya Panel / Tegangan Baterai = $100 \text{ Wp} / 12 \text{ V} \approx 8,3 \text{ A}$.
- Dengan margin keamanan 25% untuk mengakomodasi lonjakan arus pada radiasi puncak, arus SCC minimum adalah $8,3 \text{ A} \times 1,25 \approx 10,4 \text{ A}$.
- Maka, dipilih SCC PWM 12V dengan kapasitas komersial 20 A untuk memberikan margin operasional yang aman.

Berikut adalah rekapitulasi kebutuhan perangkat keras dalam format tabel.

Tabel 3.1. Kebutuhan Perangkat Keras (Hardware Requirements)

Kategori	Komponen	Spesifikasi	Jml	Fungsi
Mikrokontroler	ESP32-C3 DevKit	Single-core RISC-V 160 MHz, Wi-Fi & BLE 5, 3.3V	1	Otak sistem, pemrosesan, dan konektivitas
Sensor	Sensor pH E-201-C	Range 0–14 pH, Output Analog	1	Mengukur tingkat keasaman air
Sensor	Sensor Suhu DS18B20	1-Wire, -10° s.d. 85°C, $\pm 0.5^\circ\text{C}$	1	Mengukur suhu air kolam
Aktuator	Pompa Air DC	12V, 22W	1	Sirkulasi air
Aktuator	Motor Servo SG90	Torsi 1.8 kg/cm	1	Menggerakkan mekanisme pakan

Kategori	Komponen	Spesifikasi	Jml	Fungsi
Kontrol	Modul Relay	1-Channel, 5V, 10A	1	Saklar ON/OFF untuk pompa 12V
Kontrol	Modul RTC	DS3231 dengan baterai cadangan	1	Penjadwalan pakan yang akurat
Catu Daya	Panel Surya	Monocrystalline/Polycrystalline, 100 Wp	1	Konversi energi surya menjadi listrik
Catu Daya	Solar Charge Controller	PWM, 20A, 12V	1	Mengatur pengisian baterai
Catu Daya	Baterai	VRLA 12V, 100Ah	1	Penyimpanan energi untuk suplai sistem

3.3.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak mencakup tiga lapisan utama: firmware pada perangkat, backend di server, dan frontend di sisi pengguna.

1. Firmware (ESP32-C3):

Lingkungan Pengembangan: Arduino IDE dengan board manager ESP32 (yang juga mendukung varian ESP32-C3).

- **Bahasa Pemrograman:** C++.
- **Pustaka Utama:** WiFi.h untuk koneksi ke jaringan Wi-Fi, PubSubClient.h untuk implementasi klien MQTT, Wire.h dan RTCLib.h untuk komunikasi I2C dengan modul RTC DS3231, serta Servo.h untuk mengontrol motor servo.
- **Logika Utama:** Program akan melakukan inisialisasi semua perangkat keras, terhubung ke Wi-Fi dan broker MQTT, kemudian masuk ke dalam loop utama yang secara kontinu membaca nilai analog dari sensor pH, mengonversinya menjadi nilai pH terkalibrasi, membaca waktu dari RTC, mempublikasikan data tersebut ke broker MQTT, dan memeriksa pesan masuk dari topik kontrol untuk perintah manual.

2. Backend (Server):

- **Platform/Framework:** Node.js dengan framework Express.js akan digunakan karena sifatnya yang asynchronous dan berbasis event, sangat cocok untuk menangani koneksi IoT.
- **Database:** MySQL sebagai database relasional tunggal yang menyimpan baik data terstruktur (pengguna, konfigurasi, jadwal pakan) maupun data sensor historis (log nilai pH dan suhu dengan waktu). Skema database dirancang dengan tabel khusus dan indeks pada kolom timestamp untuk menjaga kinerja kueri historis yang efisien.
- **Fungsi Utama:** Menjalankan broker MQTT (atau terhubung ke layanan broker), membuat layanan yang berlangganan topik data dari ESP32-C3, mem-parsing dan menyimpan data ke database MySQL, serta menyediakan endpoint API (RESTful API) yang aman untuk diakses oleh aplikasi web frontend.

3. Frontend (Aplikasi Web):

- **Framework:** React.js akan digunakan untuk membangun antarmuka pengguna yang dinamis, interaktif, dan responsif.
- **Fitur Utama:** Dasbor utama untuk visualisasi data pH/suhu secara real-time dan historis menggunakan pustaka grafik seperti Chart.js. Kartu status untuk menampilkan kondisi pompa dan pakan. Panel kontrol dengan tombol dan formulir untuk interaksi pengguna. Sistem otentikasi pengguna untuk login dan logout.

Tabel 3.2. Kebutuhan Perangkat Lunak (Software Requirements)

Kategori	Perangkat Lunak / Platform	Fungsi
Firmware IDE	Arduino IDE	Pemrograman mikrokontroler ESP32-C3
Protokol Komunikasi	MQTT (Mosquitto Broker)	Komunikasi ringan antara perangkat dan server

Kategori	Perangkat Lunak / Platform	Fungsi
Backend	Node.js (dengan Express.js)	Logika server, manajemen data, dan penyediaan API
Database	MySQL	Penyimpanan data pengguna, konfigurasi, jadwal, serta data sensor historis
Frontend	React.js	Pembangunan antarmuka pengguna aplikasi web
Desain UI/UX	Figma	Perancangan mockup dan prototipe antarmuka

3.4 Diagram Use Case

Use Case Diagram digunakan untuk memodelkan fungsionalitas sistem dari sudut pandang pengguna. Diagram ini menggambarkan interaksi antara aktor (pengguna) dengan berbagai fitur (use case) yang disediakan oleh sistem (aplikasi web). Ini membantu dalam memahami persyaratan fungsional sistem secara jelas.

1. Aktor:

- **Pengguna:** Merujuk pada pemilik sistem atau petani yang akan mengoperasikan dan memantau sistem akuaponik.

2. Sistem:

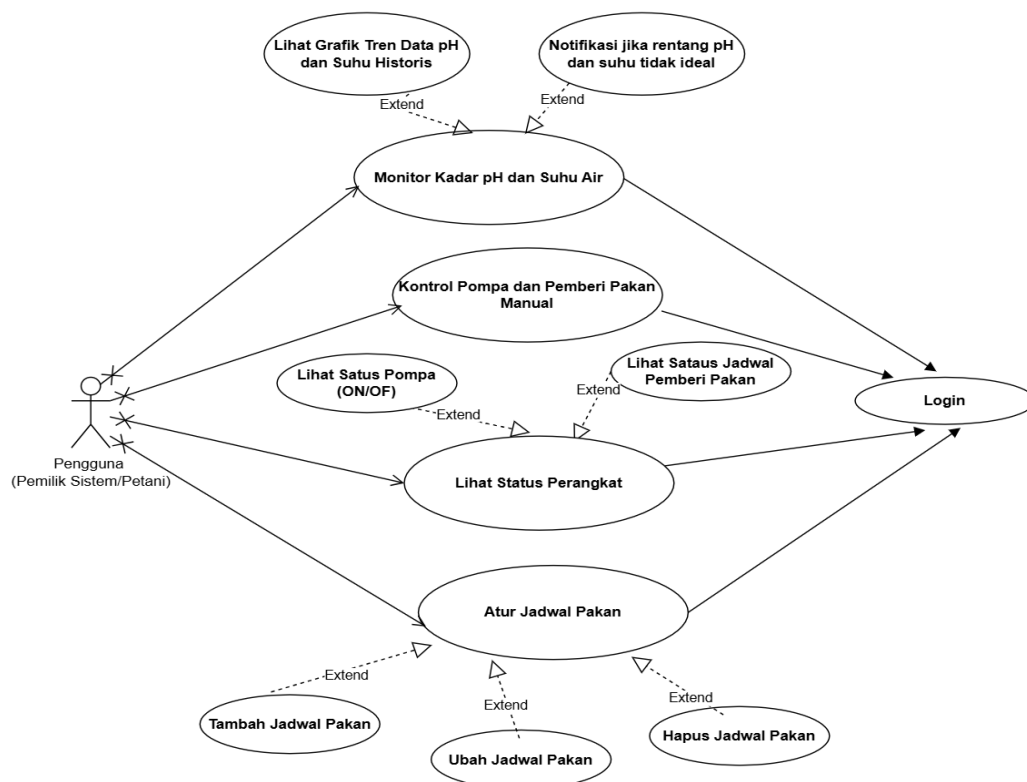
- Aplikasi Web Akuaponik Cerdas.

3. Deskripsi Use Case:

- **Login:** Pengguna harus memasukkan kredensial yang valid untuk mengakses dasbor utama. Ini adalah prasyarat untuk semua use case lainnya.
- **Monitor pH dan Suhu Air:** Pengguna dapat melihat nilai pH dan suhu air terkini yang ditampilkan secara jelas di dasbor. Use case ini juga mencakup kemampuan untuk melihat grafik tren data pH dan suhu historis (misalnya, dalam 24 jam, 7 hari dan 30 hari terakhir) dan pengguna juga diberikan notifikasi jika rentang pH/suhu tidak ideal bagi sistem akuaponik.

- **Lihat Status Perangkat:** Pengguna dapat melihat status operasional dari aktuator utama, yaitu status ON/OFF untuk pompa air dan status jadwal untuk pemberi pakan.
- **Kontrol Pompa Manual:** Pengguna memiliki opsi untuk mengesampingkan mode otomatis dan mengontrol pompa air secara manual (menghidupkan atau mematikan) melalui tombol yang tersedia di aplikasi web.
- **Atur Jadwal Pakan:** Pengguna dapat mengakses halaman pengaturan untuk menambah, mengubah, atau menghapus jadwal pemberian pakan ikan. Jadwal ini akan disimpan di server dan disinkronkan ke perangkat.
- **Logout:** Pengguna dapat keluar dari sesi aplikasi dengan aman.

Diagram berikut memvisualisasikan hubungan antara aktor dan use case tersebut, mengacu pada praktik standar pemodelan UML.



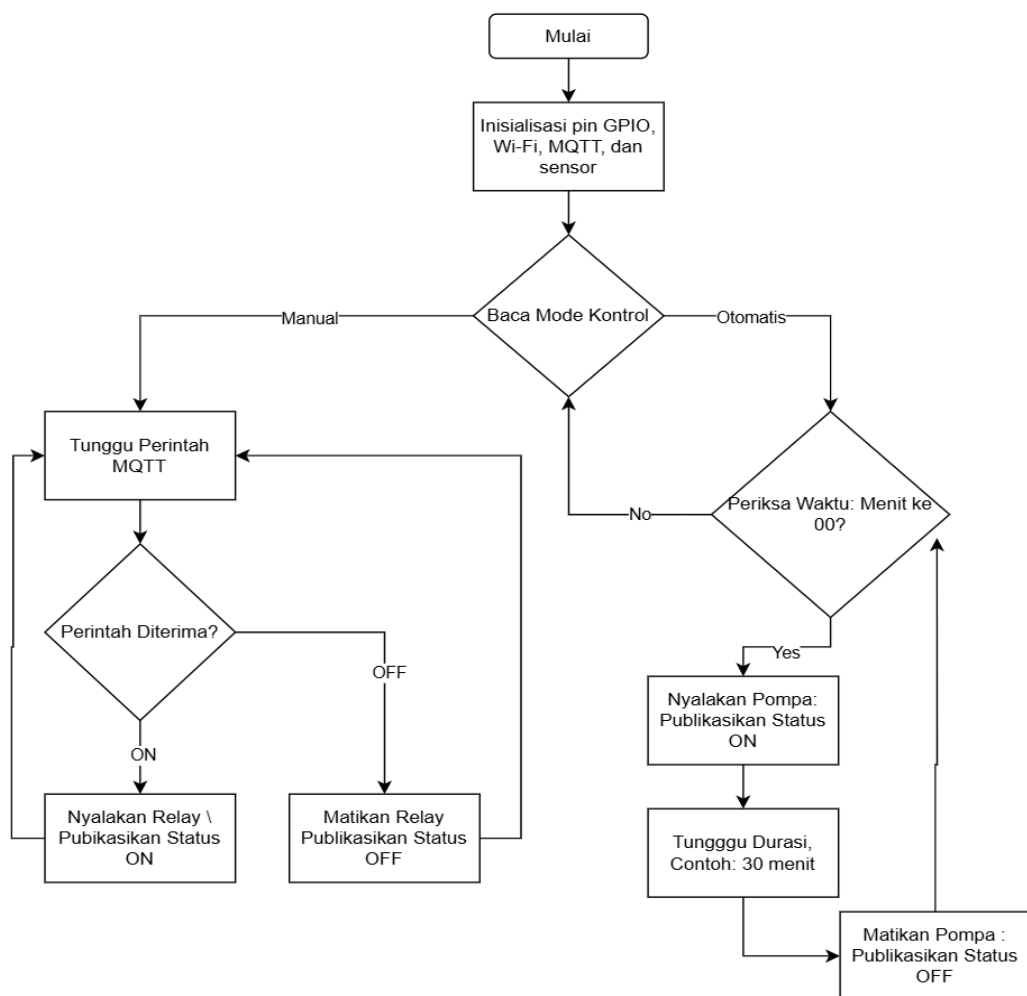
Gambar 3.1. Use Case Diagram Sistem Akuaponik Cerdas

3.5 Diagram Alir Sistem (Flowchart)

Diagram alir atau flowchart digunakan untuk menggambarkan alur logika dari proses-proses kunci yang akan diimplementasikan dalam firmware mikrokontroler ESP32-C3. Ini memberikan panduan langkah-demi-langkah yang jelas bagi programmer.

Flowchart 1: Logika Kontrol Pompa Air

Logika ini dirancang untuk menjalankan pompa secara periodik dalam mode otomatis untuk memastikan sirkulasi yang memadai tanpa harus berjalan 24/7, sehingga menghemat energi.

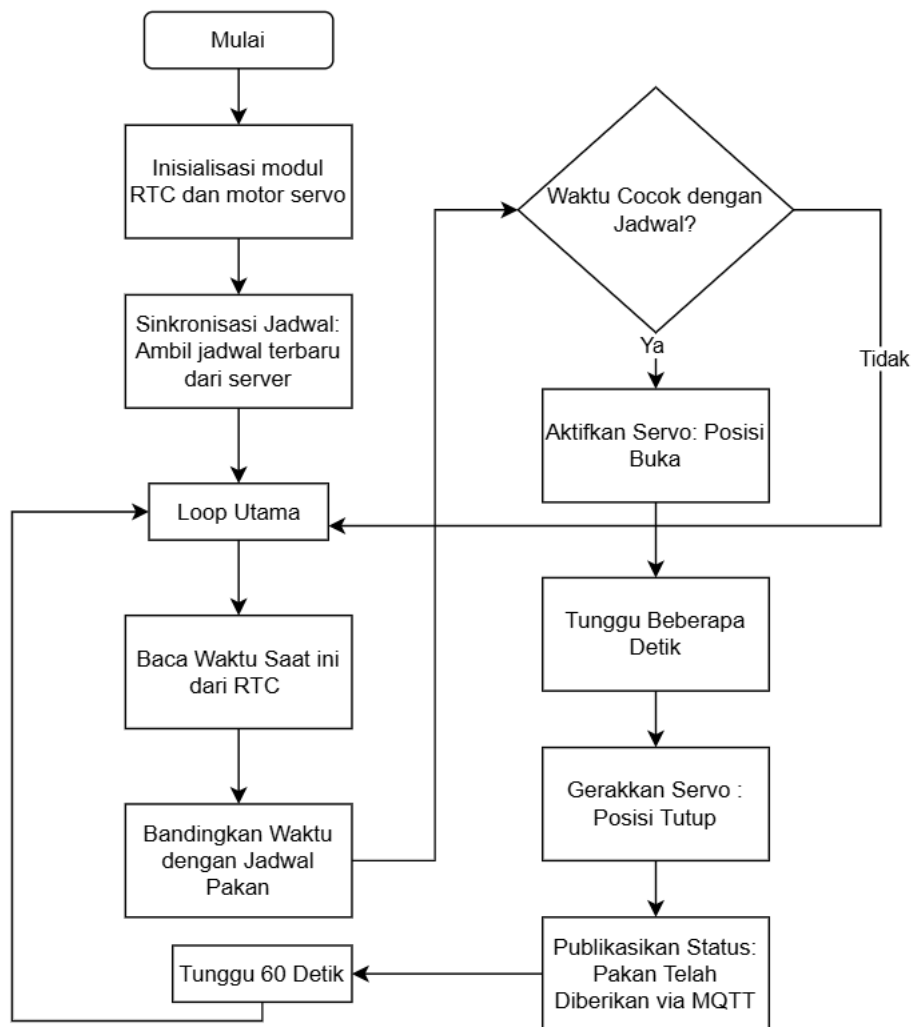


Gambar 3.2. Diagram Alir Logika Kontrol Pompa Air

1. **Mulai.**
2. **Inisialisasi Sistem:** Inisialisasi pin GPIO, Wi-Fi, MQTT, dan sensor.
3. **Baca Mode Kontrol:** Sistem memeriksa mode yang dipilih pengguna di web (Otomatis/Manual).
4. **Percabangan Mode:**
 - **Jika Manual:** Sistem akan menunggu perintah (ON/OFF) yang dipublikasikan dari aplikasi web melalui broker MQTT. Setelah menerima perintah, sistem akan mengeksekusinya (menyalakan/mematikan relay) dan kembali menunggu perintah berikutnya.
 - **Jika Otomatis:** Sistem masuk ke loop timer.
5. **Loop Timer (Mode Otomatis):**
 - Sistem memeriksa apakah waktu saat ini adalah awal jam (misalnya, menit ke-00).
 - Jika Ya: Sistem mengirim sinyal HIGH ke pin relay untuk menyalakan pompa. Status "ON" dipublikasikan ke broker MQTT.
 - Sistem menunggu selama durasi yang ditentukan (misalnya, 30 menit).
 - Setelah durasi selesai, sistem mengirim sinyal LOW ke pin relay untuk mematikan pompa. Status "OFF" dipublikasikan ke broker MQTT.
 - Sistem kembali ke awal loop timer.
 - Jika Tidak: Sistem tidak melakukan apa-apa dan kembali ke awal loop timer, terus memeriksa waktu.

Flowchart 2: Logika Pemberian Pakan Otomatis

Logika ini memastikan pakan diberikan tepat pada waktu yang telah dijadwalkan oleh pengguna, menggunakan RTC sebagai referensi waktu yang andal.



Gambar 3.3. Diagram Alir Logika Pemberian Pakan Otomatis

1. **Mulai.**
2. **Inisialisasi Sistem:** Inisialisasi modul RTC dan motor servo.
3. **Sinkronisasi Jadwal:** Saat startup, sistem meminta jadwal pakan terbaru dari server.
4. **Loop Utama:**
 - Sistem membaca waktu saat ini dari modul RTC DS3231.

- Sistem membandingkan waktu saat ini dengan daftar jadwal pakan yang tersimpan.
- Percabangan Kondisi: Apakah waktu saat ini cocok dengan salah satu jadwal?
- Jika Ya: Sistem mengirim sinyal ke motor servo untuk berputar ke posisi "Buka".
- Sistem menunggu beberapa detik agar pakan keluar.
- Sistem mengirim sinyal ke motor servo untuk kembali ke posisi "Tutup".
- Sistem mempublikasikan status "Pakan Telah Diberikan" ke broker MQTT.
- Sistem menunggu 60 detik (untuk menghindari pemberian ganda dalam menit yang sama) sebelum kembali ke loop utama.
- Jika Tidak: Sistem kembali ke awal loop utama untuk terus memeriksa waktu.

3.6 Desain Antarmuka Pengguna (UI/UX Design)

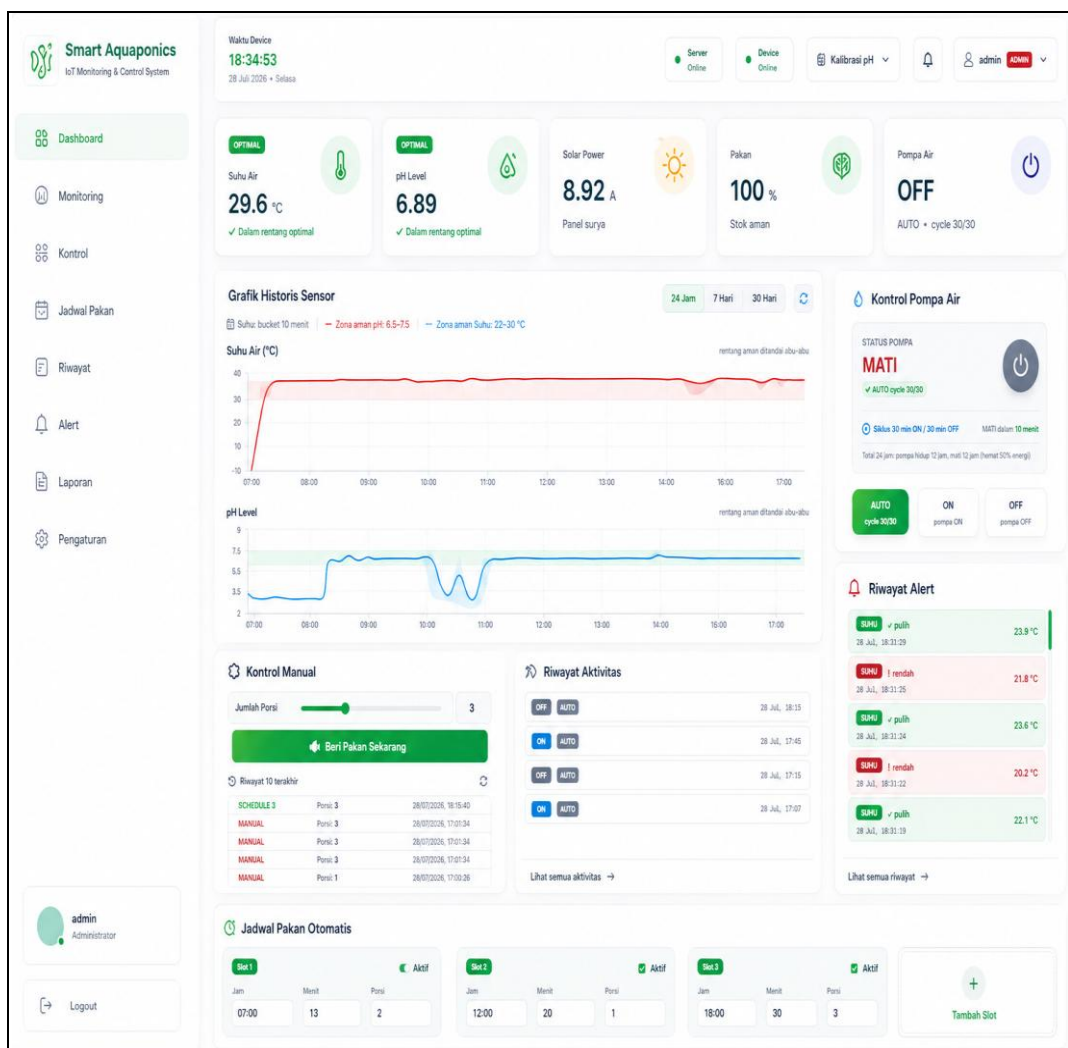
Desain antarmuka (UI) dan pengalaman pengguna (UX) untuk aplikasi web adalah aspek krusial untuk memastikan sistem ini mudah digunakan dan informatif. Desain akan berfokus pada kejelasan, kemudahan akses informasi, dan kontrol yang intuitif, mengikuti praktik terbaik dalam desain dasbor. Inspirasi visual diambil dari berbagai desain dasbor monitoring IoT dan smart farming yang ada.

Prinsip Desain:

- **Glanceability:** Pengguna harus dapat memahami status keseluruhan sistem dalam waktu kurang dari 5 detik. Ini dicapai dengan menonjolkan metrik kunci (key metrics) dengan angka besar dan indikator visual yang jelas.
- **Hierarki Informasi:** Informasi paling penting (pH saat ini, status perangkat) ditempatkan di bagian atas atau posisi paling menonjol, mengikuti pola pemindaian mata pengguna (pola F atau Z).

- **Desain Minimalis dan Bersih:** Menggunakan ruang putih (white space) yang cukup untuk menghindari kesan berantakan dan membantu pengguna fokus pada data. Palet warna akan dibatasi untuk menciptakan tampilan yang profesional dan konsisten.
- **Responsif:** Desain harus dapat beradaptasi dengan baik di berbagai ukuran layar, baik desktop maupun perangkat seluler.

Mockup Desain Dasbor Utama:



Gambar 3.4. Mockup Dasbor Utama Sistem Akuaponik Cerdas

Berikut adalah deskripsi komponen utama dari mockup dasbor yang akan dirancang menggunakan Figma atau tool sejenis.

1. **Header:** Berisi judul "Dasbor Akuaponik Cerdas", ikon notifikasi, dan profil pengguna dengan opsi logout.

2. **Kartu Metrik Utama (Key Metric Cards):**

- **Kartu Suhu Air:** Menampilkan nilai suhu air terkini dengan ukuran font yang sangat besar (misal, "29 °C"). Di bawahnya terdapat label "suhu Optimal" dan indikator visual berupa lingkaran berwarna hijau. Jika nilai suhu keluar dari rentang ideal, warna lingkaran akan berubah menjadi merah (bahaya).
- **Kartu pH Level:** Menampilkan nilai pH terkini dengan ukuran font yang sangat besar (misal, "6.89"). Di bawahnya terdapat label "pH Optimal" dan indikator visual berupa lingkaran berwarna hijau. Jika nilai pH keluar dari rentang ideal, warna lingkaran akan berubah menjadi kuning (waspada) atau merah (bahaya).
- **Kartu Solar Power:** Menampilkan daya atau arus yang dihasilkan panel surya sebagai indikator ketersediaan energi untuk mengoperasikan sistem.
- **Kartu Stok Pakan:** Menampilkan persentase sisa stok pakan pada wadah sehingga pengguna mengetahui kapan harus melakukan pengisian ulang.
- **Kartu Status Pompa:** Menampilkan status pompa air (ON/OFF) beserta mode operasinya (Otomatis atau Manual) sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sirkulasi air saat itu.

3. **Grafik Historis Suhu/pH:**

- Sebuah grafik garis (line chart) besar yang mendominasi bagian tengah dasbor. Sumbu X merepresentasikan waktu (misal, 24 jam terakhir) dan sumbu Y merepresentasikan nilai Suhu/pH. Terdapat area bayangan yang menunjukkan rentang pH optimal (6.0-7.0). Pengguna dapat memilih rentang waktu yang berbeda (misal, 7 hari, 30 hari) melalui tombol filter.

4. Panel Kontrol dan Pengaturan:

- **Kontrol Pompa:** Sebuah bagian dengan judul "Kontrol Manual" yang berisi tombol toggle sederhana untuk "Hidupkan/Matikan Pompa". Tombol ini akan nonaktif jika sistem berada dalam mode otomatis.
- **Pengaturan Pakan:** Sebuah menu "Atur Jadwal Pakan Otomatis" yang di mana pengguna dapat melihat daftar jadwal saat ini dan menambahkan jadwal baru dengan memasukkan jam, menit dan jumlah porsi pakan.

Slot	Jam	Menit	Porsi	Status
Slot 1	07:00	13	2	Aktif
Slot 2	12:00	20	1	Aktif
Slot 3	18:00	30	3	Aktif

Simpan & Kirim ke Device

Gambar 3.5. Mockup Atur Jadwal Pakan Otomatis

3.7 Work Breakdown Structure (WBS)

Work Breakdown Structure (WBS) adalah alat manajemen proyek fundamental yang digunakan untuk memecah lingkup total proyek menjadi komponen-komponen yang lebih kecil, dapat dikelola, dan berorientasi pada hasil (deliverables). Penyusunan WBS penting untuk memastikan semua pekerjaan yang diperlukan teridentifikasi, memfasilitasi perencanaan jadwal yang akurat, estimasi biaya, dan alokasi sumber daya. Dengan WBS, kemajuan proyek dapat dilacak dengan lebih efektif.

Untuk proyek pengembangan sistem akuaponik cerdas ini, WBS akan disusun dalam format tabel hierarkis, yang mencakup semua fase dari manajemen proyek hingga pengembangan perangkat keras dan lunak, serta pengujian akhir.

Tabel 3.3. Work Breakdown Structure (WBS) Proyek Akuaponik Cerdas

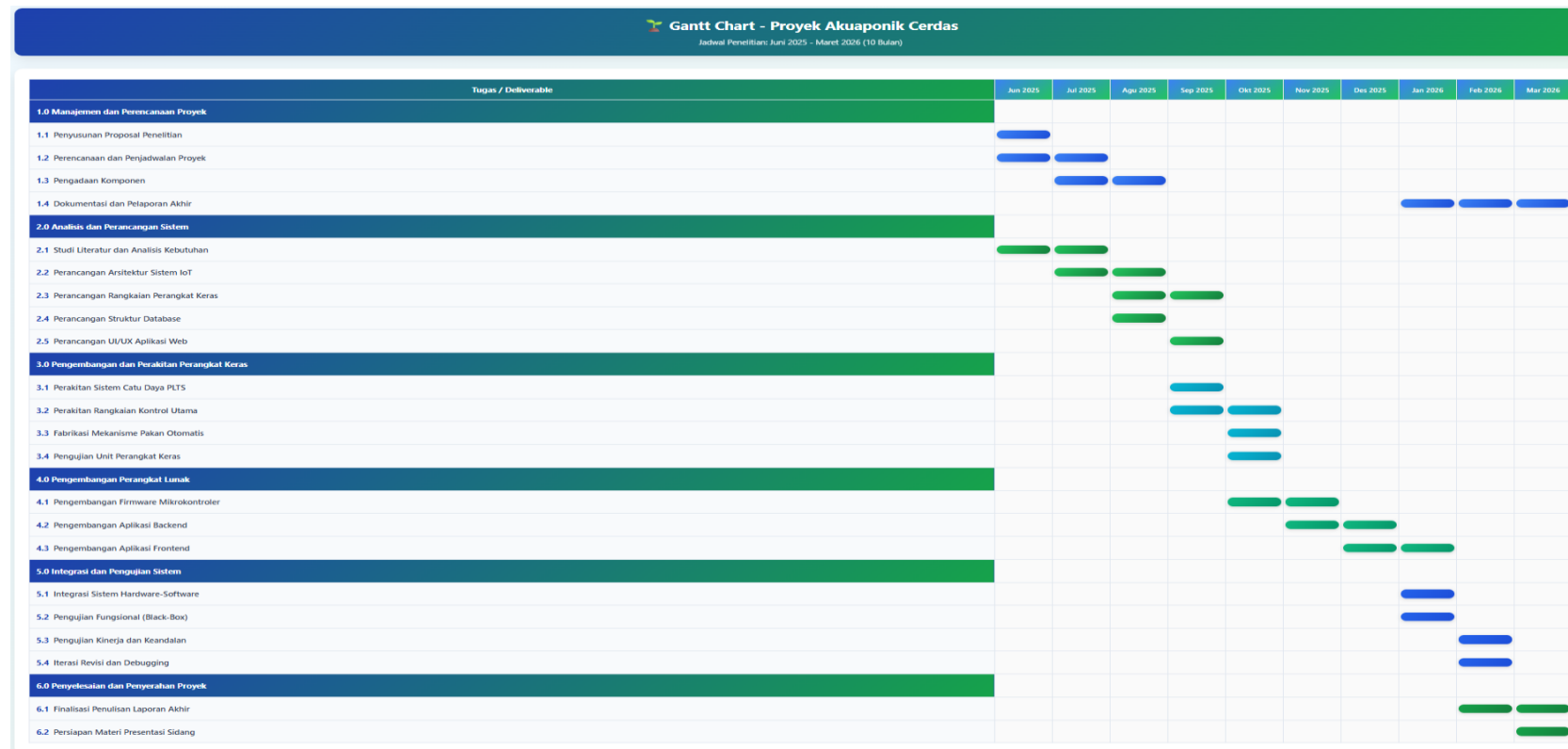
WBS ID	Nama Tugas / Deliverable	Deskripsi Singkat
1.0	Manajemen dan Perencanaan Proyek	Aktivitas yang berkaitan dengan inisiasi, perencanaan, koordinasi, dan penutupan proyek.
1.1	Penyusunan Proposal Penelitian	Mengembangkan proposal tesis yang komprehensif, termasuk studi pendahuluan dan perumusan masalah.
1.2	Perencanaan dan Penjadwalan Proyek	Membuat jadwal detail proyek (Gantt Chart) berdasarkan WBS dan mengidentifikasi jalur kritis.
1.3	Pengadaan Komponen	Melakukan riset, pembelian, dan penerimaan semua komponen perangkat keras yang dibutuhkan.
1.4	Dokumentasi dan Pelaporan Akhir	Menulis laporan kemajuan berkala dan menyusun laporan akhir (tesis) secara sistematis.
2.0	Analisis dan Perancangan Sistem	Fase desain konseptual dan teknis sebelum implementasi fisik dan kode.
2.1	Studi Literatur dan Analisis Kebutuhan	Mengumpulkan dan menganalisis referensi ilmiah, datasheet, dan mendefinisikan kebutuhan fungsional sistem.
2.2	Perancangan Arsitektur Sistem IoT	Mendesain arsitektur end-to-end (edge, network, backend, frontend) dan alur data.
2.3	Perancangan Rangkaian Perangkat Keras	Membuat skematik rangkaian elektronik, termasuk koneksi mikrokontroler, sensor, dan aktuator.
2.4	Perancangan Struktur Database	Mendesain skema database relasional MySQL termasuk tabel pengguna, jadwal, dan log data sensor historis.
2.5	Perancangan UI/UX Aplikasi Web	Membuat wireframe, mockup resolusi tinggi, dan prototipe interaktif antarmuka pengguna.
3.0	Pengembangan dan Perakitan Perangkat Keras	Realisasi fisik dari semua komponen perangkat keras yang telah dirancang.

WBS ID	Nama Tugas / Deliverable	Deskripsi Singkat
3.1	Perakitan Sistem Catu Daya PLTS	Merangkai dan menguji koneksi antara panel surya, SCC, dan baterai.
3.2	Perakitan Rangkaian Kontrol Utama	Menyolder dan menghubungkan ESP32-C3, sensor pH, modul RTC, dan modul relay pada PCB.
3.3	Fabrikasi Mekanisme Pakan Otomatis	Merancang dan mencetak (jika perlu) wadah pakan dan memasang motor servo.
3.4	Pengujian Unit Perangkat Keras	Melakukan pengujian individual pada setiap komponen perangkat keras untuk memastikan fungsionalitasnya.
4.0	Pengembangan Perangkat Lunak	Proses penulisan kode untuk semua lapisan perangkat lunak sistem.
4.1	Pengembangan Firmware Mikrokontroler (ESP32-C3)	Menulis kode untuk membaca sensor, mengontrol aktuator, dan berkomunikasi melalui MQTT.
4.2	Pengembangan Aplikasi Backend (Server)	Membangun API, logika bisnis, koneksi ke database, dan layanan untuk menangani data MQTT.
4.3	Pengembangan Aplikasi Frontend (Web App)	Mengimplementasikan desain UI/UX menjadi aplikasi web fungsional menggunakan React.js.
5.0	Integrasi dan Pengujian Sistem	Menggabungkan semua komponen yang telah dikembangkan dan melakukan pengujian menyeluruh.
5.1	Integrasi Sistem Hardware-Software	Menghubungkan prototipe perangkat keras dengan sistem perangkat lunak (backend & frontend).
5.2	Pengujian Fungsional (Black-Box)	Memverifikasi bahwa setiap fitur pada aplikasi web berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan.
5.3	Pengujian Kinerja dan Keandalan	Menjalankan sistem secara kontinu selama periode tertentu (misal: 7×24 jam) untuk mengukur akurasi, stabilitas, dan mengidentifikasi potensi kegagalan.

WBS ID	Nama Tugas / Deliverable	Deskripsi Singkat
5.4	Iterasi Revisi dan Debugging	Menganalisis hasil pengujian, memperbaiki bug perangkat lunak, dan menyempurnakan kinerja sistem.
6.0	Penyelesaian dan Penyerahan Proyek	Tahap finalisasi dokumentasi dan persiapan untuk evaluasi akhir.
6.1	Finalisasi Penulisan Laporan Akhir	Menyelesaikan penulisan seluruh bab tesis, termasuk hasil dan pembahasan, serta kesimpulan.
6.2	Persiapan Materi Presentasi Sidang	Membuat slide presentasi dan menyiapkan demo langsung dari prototipe yang berfungsi.

3.8 Jadwal Penelitian (Timeframe)

Jadwal penelitian direncanakan untuk diselesaikan dalam 10 bulan, seperti yang digambarkan dalam grafik Gantt berikut.



Gambar 3.6. Jadwal Penelitian (Timeframe)

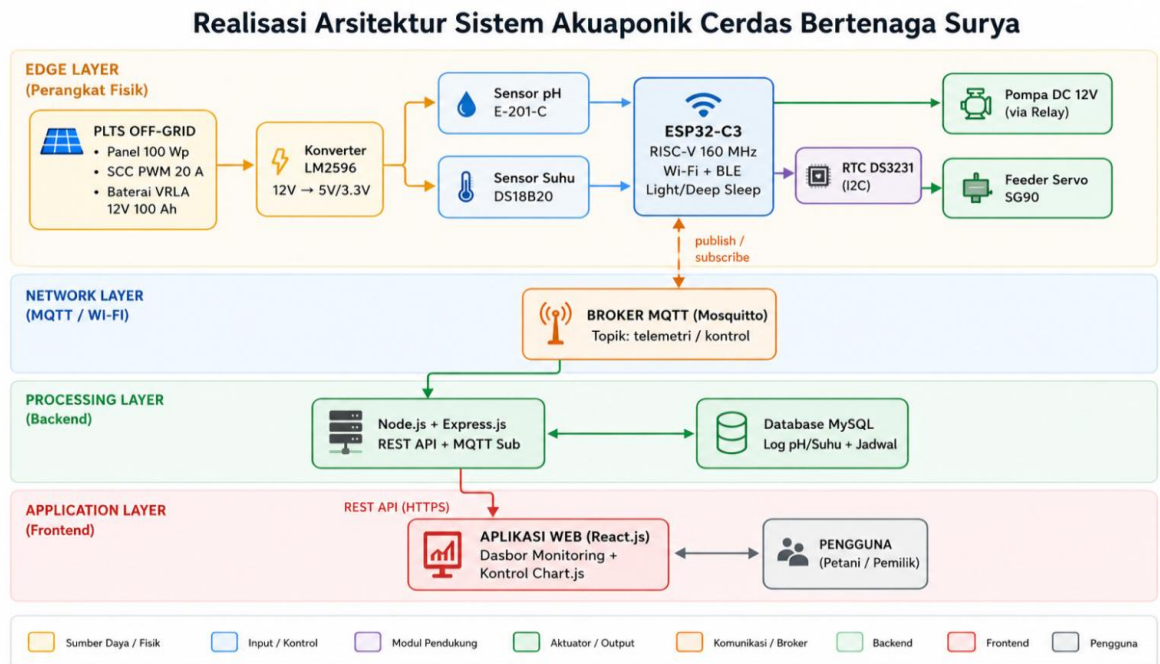
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil realisasi dari rancangan yang telah diuraikan pada Bab III, yang mencakup tahap *Develop* (pengembangan dan validasi produk) serta tahap Pengujian dan Evaluasi dalam kerangka model pengembangan 4-D. Pembahasan dimulai dari implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, dilanjutkan dengan kalibrasi sensor, kemudian rangkaian pengujian sistematis yang mencakup pengujian akurasi sensor, pengujian fungsional aplikasi (*black-box*), pengujian aktuator, pengujian kinerja sistem catu daya tenaga surya, pengujian keandalan operasional selama tujuh hari berturut-turut, serta pengujian waktu respons sistem. Bagian akhir bab ini menyajikan pembahasan menyeluruh yang mengaitkan hasil pengujian dengan rumusan masalah dan tujuan penelitian.

4.1 Hasil Implementasi Sistem

Implementasi sistem merupakan realisasi fisik dan digital dari seluruh rancangan arsitektur berlapis (*layered architecture*) yang telah didefinisikan pada Subbab 3.3.1. Sistem yang dibangun terdiri atas empat lapisan yang saling terhubung, yaitu lapisan perangkat fisik (*edge layer*), lapisan jaringan (*network layer*), lapisan pemrosesan (*processing layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*). Realisasi arsitektur sistem terintegrasi secara keseluruhan diperlihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Realisasi Arsitektur Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya

4.1.1 Implementasi Perangkat Keras

Perakitan perangkat keras dilakukan sesuai dengan skematik rangkaian dan daftar kebutuhan pada Tabel 3.1. Mikrokontroler ESP32-C3 berperan sebagai pusat kendali *edge* yang mengintegrasikan seluruh sensor dan aktuator. Sensor pH E-201-C dihubungkan ke pin ADC (GPIO3) melalui modul pengkondisi sinyal, sementara sensor suhu DS18B20 dihubungkan ke pin digital (GPIO4) menggunakan antarmuka 1-Wire. Modul RTC DS3231 dikomunikasikan melalui antarmuka I2C (GPIO8 sebagai SDA dan GPIO9 sebagai SCL). Pompa air DC 12V dikendalikan melalui modul relay 1-channel yang terhubung ke GPIO7, dan motor servo SG90 untuk mekanisme pemberi pakan dikendalikan melalui sinyal PWM dari GPIO5 menggunakan peripheral LEDC.

Karena ESP32-C3 beroperasi pada tegangan logika 3,3V sedangkan sensor pH dan servo membutuhkan catu 5V, sebuah pembagi tegangan dan penyesuai level diterapkan pada jalur sinyal analog agar tegangan keluaran sensor pH tidak melampaui batas aman pin ADC (0–3,3V). Seluruh titik sambungan diverifikasi

menggunakan multimeter sebelum sistem dialiri daya penuh untuk menghindari kerusakan komponen.

4.1.2 Implementasi Sistem Catu Daya Tenaga Surya (PLTS)

Sistem catu daya direalisasikan sesuai hasil perhitungan pada Subbab 3.3.2, yaitu panel surya 100 Wp, *Solar Charge Controller* (SCC) PWM 20A, dan baterai VRLA 12V 100Ah. Panel surya dihubungkan ke terminal PV pada SCC, baterai ke terminal BAT, dan beban sistem ke terminal LOAD. Untuk menyuplai komponen kendali bertegangan rendah, sebuah konverter *step-down* LM2596 menurunkan tegangan 12V dari baterai menjadi 5V dan 3,3V yang stabil bagi ESP32-C3, sensor, dan modul pendukung.

Konfigurasi ini bersifat *off-grid* penuh sehingga sistem sepenuhnya mandiri dari jaringan PLN. Pompa DC 12V ditenagai langsung dari terminal LOAD SCC, sedangkan komponen kendali ditenagai melalui LM2596. Dengan demikian, kerugian konversi diminimalkan karena tidak digunakan inverter DC-ke-AC, sejalan dengan justifikasi efisiensi pada Subbab 2.5.2.

4.1.3 Implementasi Firmware Mikrokontroler

Firmware ditulis dalam bahasa C++ menggunakan Arduino IDE dengan *board manager* ESP32. Pustaka yang digunakan meliputi `WiFi.h` untuk konektivitas, `PubSubClient.h` untuk klien MQTT, `Wire.h` dan `RTClib.h` untuk RTC DS3231, `OneWire.h` dan `DallasTemperature.h` untuk DS18B20, serta `ESP32Servo.h` untuk motor servo. Program mengimplementasikan dua alur logika utama yang telah dirancang pada Subbab 3.5, yaitu logika kontrol pompa berbasis *timer* dan logika pemberian pakan berbasis jadwal RTC.

Untuk mendukung kemandirian energi, firmware menerapkan strategi manajemen daya dengan mode *light sleep* pada siklus 5 detik aktif dan 25 detik tidur, sehingga arus rata-rata mikrokontroler ditekan menjadi sekitar 16 mA. Data telemetri (nilai pH, suhu, status pompa, status pakan) dipublikasikan secara periodik ke topik `akuaponik/telemetri`, sementara perintah dari pengguna diterima melalui topik `akuaponik/kontrol`. Persamaan kalibrasi pH ditanamkan

langsung dalam firmware untuk mengonversi tegangan ADC menjadi nilai pH terkalibrasi.

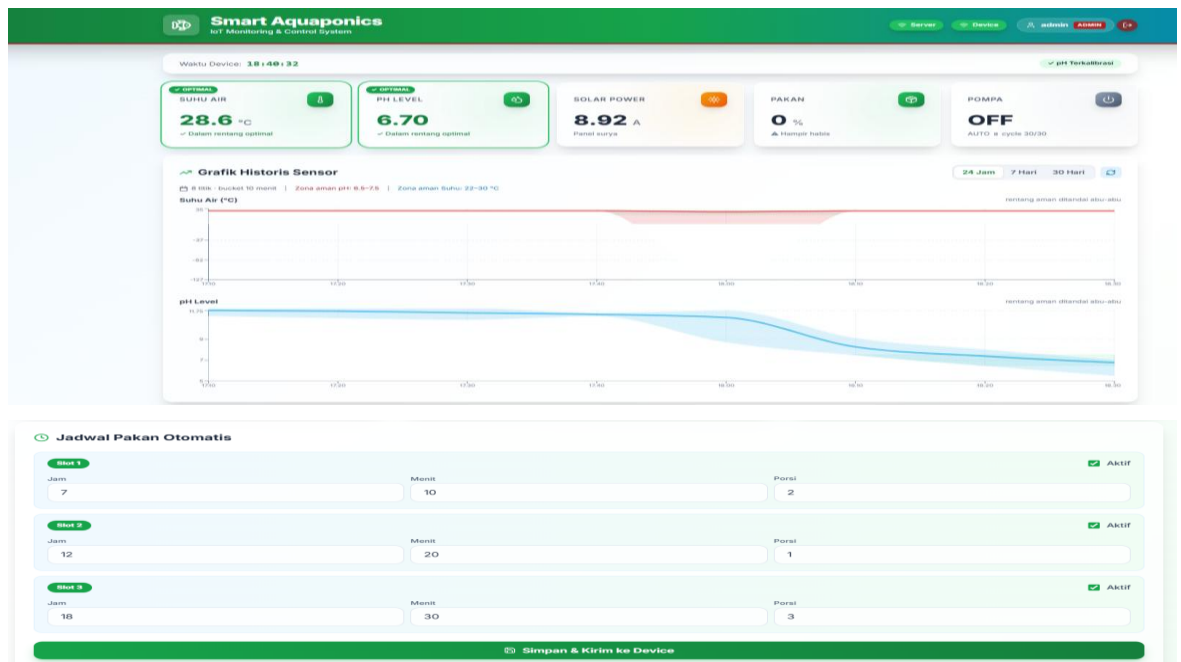
4.1.4 Implementasi Backend dan Basis Data

Layanan *backend* dibangun menggunakan Node.js dengan kerangka kerja Express.js. Broker MQTT Mosquitto dijalankan pada server lokal untuk menjembatani komunikasi antara ESP32-C3 dan *backend*. Sebuah layanan pelanggan (*subscriber*) berlangganan topik telemetri, mem-*parsing* pesan berformat JSON, lalu menyimpannya ke basis data MySQL. Basis data dirancang dengan tabel `users`, `device_status`, `sensor_data`, `feeding_schedule`, dan `ph_calibration`. Kolom `timestamp` pada tabel `sensor_data` diberi indeks untuk menjaga kinerja kueri data historis. *Backend* juga menyediakan sekumpulan *endpoint* REST API yang diakses oleh aplikasi web untuk mengambil data real-time, data historis, dan mengirimkan perintah kontrol. Untuk menangani besarnya volume data IoT (sekitar 120.960 paket telemetri per minggu), backend dilengkapi dengan fungsi penjadwalan otomatis menggunakan modul *node-cron* pada Node.js. Sesuai dengan skenario pengujian (Subbab 4.3) di mana data telemetri diagregasi per jam untuk analisis, modul *cron* ini secara rutin menjalankan kueri pembersihan untuk merangkum data rekaman usia lanjut dan menghapus sisa data mentah yang melebihi batas waktu retensi. Implementasi ini berhasil menjaga kueri REST API aplikasi web untuk memuat grafik historis 30 hari tetap berada pada rentang *latency* di bawah 1,5 detik, tanpa membebani memori server basis data.

4.1.5 Implementasi Aplikasi Web *Smart Aquaponics*

Antarmuka pengguna direalisasikan sebagai aplikasi web bernama *Smart Aquaponics* yang dibangun menggunakan React.js sesuai rancangan UI/UX pada Subbab 3.6. Aplikasi ini terhubung ke *backend* melalui REST API dan menampilkan data secara real-time. Dasbor menyajikan kartu metrik utama, yaitu indikator pH, suhu air, status pompa, stok pakan dan kondisi baterai surya; dua buah grafik historis pH dan suhu berbasis Chart.js dengan pilihan rentang 24 jam, 7 hari dan 30 hari; serta panel kontrol untuk pemilihan mode pompa (otomatis/manual),

pengaturan jadwal pakan, dan pemantauan energi PLTS. Prinsip *glanceability* diwujudkan melalui angka metrik berukuran besar dan indikator warna adaptif (hijau untuk kondisi optimal, merah untuk kondisi peringatan). Tampilan dasbor utama hasil implementasi diperlihatkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Tampilan Dasbor Utama Aplikasi Web *Smart Aquaponics* Hasil Implementasi

Aplikasi juga dilengkapi mekanisme autentikasi berbasis JWT pada halaman masuk ataupun halaman login. Selain itu aplikasi juga dilengkapi dengan pemberitahuan *alert* melalui dasbor dan Telegram jika ada kondisi anomali atau kondisi suhu ataupun pH yang tidak sesuai dengan rentang optimal dari sistem akuaponik.



Gambar 4.3. Tampilan Notifikasi(*Alert*) Telegram yang diterima oleh *user*

4.2 Kalibrasi Sensor

4.2.1 Kalibrasi Sensor pH

Kalibrasi sensor pH dilakukan menggunakan prosedur kalibrasi multi-titik dengan tiga larutan *buffer* standar, yaitu pH 4,01; pH 6,86; dan pH 9,18. Probe sensor dicelupkan ke dalam masing-masing larutan, dan tegangan analog keluaran dicatat setelah pembacaan stabil. Hasil pencatatan tegangan disajikan pada Tabel 4.1.

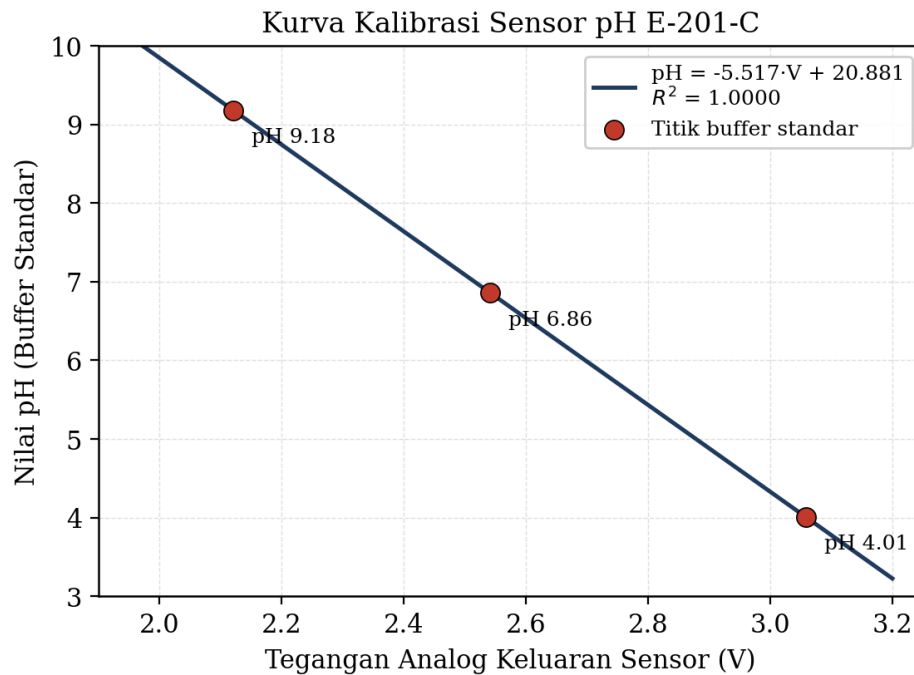
Tabel 4.1. Hasil Kalibrasi Tiga Titik Sensor pH E-201-C

Larutan Buffer Standar	Nilai pH	Tegangan Analog (V)	Suhu Larutan (°C)
Buffer asam	4,01	3,058	27,0
Buffer netral	6,86	2,541	27,0
Buffer basa	9,18	2,121	27,0

Dari ketiga titik data tersebut, dilakukan regresi linear untuk memperoleh persamaan konversi tegangan menjadi nilai pH. Persamaan garis yang diperoleh adalah:

$$\text{pH} = -5,517 \times V + 20,882$$

dengan V adalah tegangan analog keluaran sensor (dalam volt). Koefisien determinasi (R^2) dari regresi ini mencapai 0,9999, yang menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat antara tegangan dan nilai pH. Persamaan inilah yang ditanamkan ke dalam firmware ESP32-C3. Kurva kalibrasi beserta titik-titik buffer standar diperlihatkan pada Gambar 4.4.

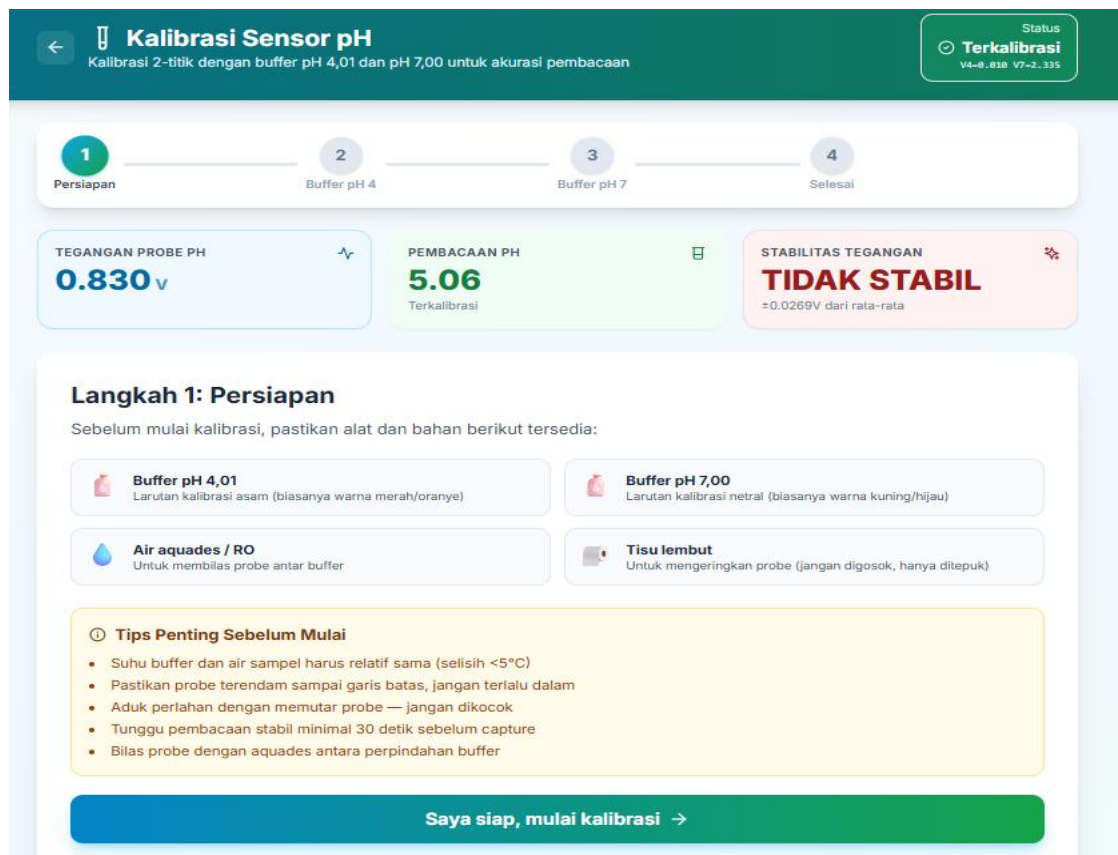


Gambar 4.4. Kurva Kalibrasi Linear Sensor pH E-201-C

4.2.2 Kalibrasi pH Interaktif Berbasis Dasbor

Karena elektroda pH mengalami penyimpangan ("drift") seiring waktu, sistem Smart Aquaponics ini dilengkapi fitur kalibrasi pH interaktif dua titik yang dapat dijalankan langsung dari dasbor tanpa memprogram ulang perangkat. Operator cukup menekan tombol Kalibrasi pH untuk membuka jendela kalibrasi yang menampilkan tegangan probe secara langsung. Prosedurnya: probe dicelupkan ke larutan *buffer* pH 4,00 lalu ditekan tombol Rekam pH 4, kemudian dicelupkan ke *buffer* pH 7,00 dan ditekan Rekam pH 7. Pada saat perekaman, mikrokontroler ESP32-C3 mencuplik tegangan ADC probe saat itu juga dan menyimpannya secara permanen ke EEPROM (ditandai *magic byte* 0xCA), sehingga kalibrasi tetap

tersimpan meskipun perangkat dimatikan. Tampilan antarmuka kalibrasi interaktif diperlihatkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Antarmuka Kalibrasi pH Interaktif Dua Titik pada Dasbor Smart Aquaponics sistem

Dari dua titik tegangan yang terekam, sistem menghitung kemiringan ("slope") garis kalibrasi lokal menggunakan persamaan $\text{slope} = 3,0 / (V7 - V4)$, lalu mengonversi tegangan menjadi nilai pH melalui $\text{pH} = 7,0 + (V - V7) \times \text{slope}$. Hasil satu sesi kalibrasi interaktif disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil Satu Sesi Kalibrasi pH Interaktif Dua Titik

Titik Buffer Standar	Nilai pH Acuan	Tegangan Terekam (V)
Buffer netral	7,00	1,500
Buffer asam	4,01	1,980
Kemiringan (slope) hasil perhitungan	—	−6,25 pH/V

Fitur ini memberikan nilai tambah operasional yang signifikan: pemeliharaan akurasi sensor menjadi mudah dilakukan oleh pengguna awam secara berkala di lapangan, tanpa memerlukan koneksi ke komputer maupun kompilasi ulang firmware. Hal ini melengkapi kalibrasi laboratorium tiga titik pada Subbab 4.2.1 yang menjadi dasar persamaan bawaan firmware.

Metode kalibrasi dua titik ini berlandaskan pada model respons linier elektroda pH. Titik netral (pH 7,00) menetapkan potensial offset (titik potong), sedangkan titik asam (pH 4,01) menetapkan kemiringan (*slope*) garis alih. Karena elektroda kaca mengalami penuaan yang secara progresif menurunkan kemiringannya dari nilai Nernst ideal, kalibrasi dua titik berkala mampu memulihkan kedua parameter fungsi alih sekaligus, sehingga memadai untuk pemeliharaan akurasi di lapangan. Nilai kemiringan hasil kalibrasi ($-6,25 \text{ pH/V}$) merepresentasikan respons Nernstian yang telah diperkuat oleh rangkaian pengkondisi sinyal; nilai tersebut setara dengan sekitar 160 mV per satuan pH pada domain tegangan terkondisi, konsisten dengan penguatan sinyal keluaran elektroda agar sesuai rentang masukan ADC mikrokontroler.

4.2.3 Validasi Sensor Suhu DS18B20

Sensor suhu DS18B20 merupakan sensor digital terkalibrasi dari pabrikan dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sehingga tidak memerlukan kalibrasi persamaan seperti sensor pH. Namun, validasi tetap dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap termometer digital standar pada rentang suhu 25°C hingga 31°C . Hasil validasi menunjukkan selisih rata-rata sebesar $0,2^\circ\text{C}$, yang masih berada dalam batas toleransi akurasi sensor. Dengan demikian, sensor DS18B20 dinyatakan layak digunakan tanpa penyesuaian tambahan.

4.3 Skenario dan Lingkungan Pengujian

Pengujian dilaksanakan pada prototipe skala rumah tangga yang dioperasikan secara berkelanjutan. Sistem akuaponik berisi kolam ikan dengan volume ± 60 liter dan media tanam *grow bed* untuk tanaman kangkung. Prototipe ditenagai sepenuhnya oleh sistem PLTS *off-grid*. Pengujian menyeluruh dilakukan selama

tujuh hari berturut-turut (7×24 jam), dengan data telemetri direkam setiap lima detik dan diagregasi per jam untuk keperluan analisis. Metrik yang diukur meliputi akurasi sensor, keberhasilan fungsional aplikasi, keandalan aktuator, kinerja catu daya, stabilitas konektivitas, dan waktu respons sistem.

4.4 Pengujian Akurasi Sensor

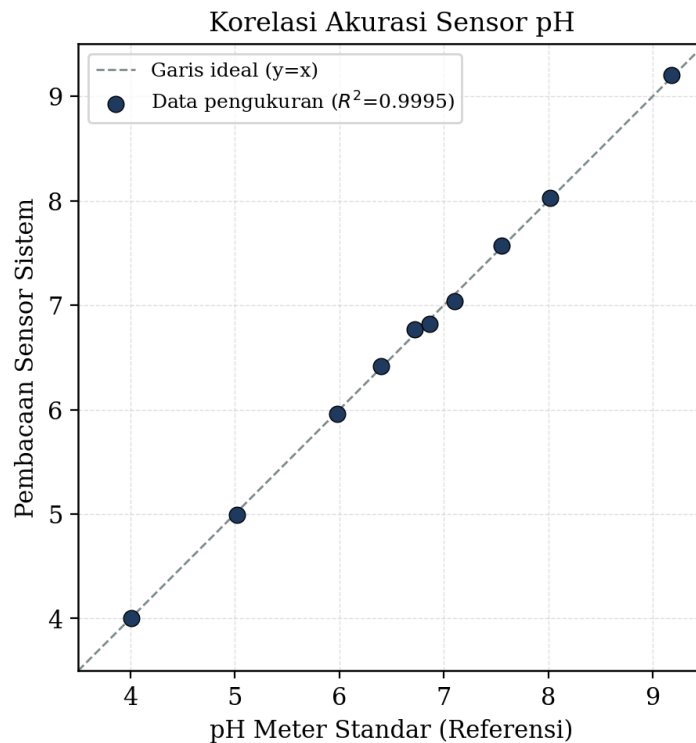
4.4.1 Akurasi Sensor pH

Pengujian akurasi sensor pH dilakukan dengan membandingkan pembacaan sistem terhadap pH meter digital standar sebagai acuan pada sepuluh titik pengukuran yang tersebar pada rentang pH 4 hingga 9. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH terhadap pH Meter Standar

No	pH Meter Standar	Pembacaan Sistem	Selisih (Error)	Error (%)
1	4,01	4,00	0,01	0,25
2	5,02	4,99	0,03	0,60
3	5,98	5,96	0,02	0,33
4	6,40	6,42	0,02	0,31
5	6,72	6,77	0,05	0,74
6	6,86	6,82	0,04	0,58
7	7,10	7,04	0,06	0,85
8	7,55	7,57	0,02	0,26
9	8,02	8,03	0,01	0,12
10	9,18	9,20	0,02	0,22

Berdasarkan data pada Tabel 4.2, selisih pembacaan sensor terhadap acuan berkisar antara 0,01 hingga 0,06 satuan pH, dengan rata-rata kesalahan absolut (*Mean Absolute Error*) sebesar 0,028 dan rata-rata galat relatif sebesar 0,43%. Nilai akurasi keseluruhan sistem mencapai 99,57%. Grafik korelasi antara pembacaan sistem dan pH meter standar diperlihatkan pada Gambar 4.7, yang memperlihatkan sebaran titik data yang sangat dekat dengan garis ideal ($y = x$) dengan koefisien determinasi 0,9995.



Gambar 4.6. Korelasi Pembacaan Sensor pH Sistem terhadap pH Meter Standar

Tingginya akurasi sensor pH ini dapat diterangkan secara ilmiah melalui sifat respons elektroda kaca yang mendekati ideal dan bersifat linier terhadap nilai pH. Sesuai persamaan *Nernst*, potensial elektroda berubah proporsional terhadap pH dengan kemiringan teoretis sekitar 59,16 mV per satuan pH pada suhu 25°C. Karena hubungan tegangan–pH bersifat linier pada rentang uji, model regresi orde pertama mampu menangkap fungsi alih sensor dengan galat sisa (*residual*) yang sangat kecil, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai $R^2 = 0,9999$. Galat pembacaan yang tersisa (0,01–0,06 satuan pH) bersumber terutama dari tiga faktor: (1) derau kuantisasi ADC 12-bit yang setara $\pm 0,8$ mV per level atau ekuivalen $\pm 0,005$ pH; (2) ketergantungan kemiringan Nernst terhadap suhu larutan, sekitar 0,2% per °C; dan (3) penyimpangan kecil potensial sambungan pada elektroda referensi. Untuk menekan komponen derau acak, *firmware* merata-ratakan sepuluh cuplikan ADC pada setiap pembacaan, sehingga amplitudo derau secara teoretis berkurang sebesar faktor $\sqrt{10} \approx 3,16$ kali. Kombinasi respons linier elektroda dan strategi penapisan

inilah yang menjelaskan mengapa galat pengukuran bernilai kecil sekaligus tidak menunjukkan pola sistematis.

Di samping akurasi kondisi tunak yang tinggi tersebut, selama pengujian teramati satu kendala praktis pada waktu respons sensor pH E-201-C. Setiap kali probe dipindahkan antarlarutan atau setelah terjadi perubahan kondisi air, elektroda memerlukan waktu stabilisasi yang relatif lama—berkisar 15 hingga 30 menit—sebelum pembacaan mencapai nilai tunak yang akurat. Lambatnya waktu tanggap ini diduga bersumber dari karakteristik sekaligus mutu manufaktur elektroda kaca berbiaya rendah E-201-C, antara lain impedansi membran yang tinggi, penuaan sambungan (*junction*) pada elektroda referensi, serta konsistensi larutan pengisi yang kurang terjaga, sehingga sensor cenderung mengalami penyimpangan (*drift*) dan menuntut kalibrasi ulang yang lebih sering. Perlu ditegaskan bahwa kendala ini berada pada domain waktu respons dan tidak menurunkan akurasi tunak yang dilaporkan pada Tabel 4.3; namun demikian, keterbatasan tersebut mengurangi kecepatan sistem dalam menangkap perubahan pH secara seketika sehingga menjadi dasar rekomendasi peningkatan (*upgrade*) sensor pada Subbab 5.2.

4.4.2 Akurasi Sensor Suhu

Pengujian akurasi sensor suhu DS18B20 dilakukan pada lima titik pengukuran menggunakan termometer digital standar sebagai acuan. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Suhu DS18B20

No	Termometer Standar (°C)	Pembacaan Sistem (°C)	Selisih (°C)
1	25,4	25,6	0,2
2	27,1	26,9	0,2
3	28,3	28,4	0,1
4	29,6	29,9	0,3
5	30,8	30,6	0,2

Selisih pembacaan sensor suhu berkisar antara 0,1°C hingga 0,3°C dengan rata-rata 0,2°C. Nilai ini konsisten dengan spesifikasi akurasi pabrikan sebesar

$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, sehingga sensor suhu dinyatakan akurat dan andal untuk memantau kondisi termal kolam.

Secara ilmiah, keunggulan akurasi ini bersumber dari arsitektur sensor DS18B20 yang bersifat digital dan telah dikalibrasi pabrikan. Konversi suhu menjadi besaran digital dilakukan di dalam sensor menggunakan pengubah analog-ke-digital 12-bit internal, sehingga tidak terdapat rantai sinyal analog eksternal yang rentan terhadap derau maupun kesalahan penguatan. Transmisi data melalui antarmuka 1-Wire juga dilengkapi mekanisme pemeriksaan integritas CRC yang menjamin data tidak terkorupsi selama pengiriman. Dengan demikian, selisih $0,1-0,3^{\circ}\text{C}$ yang teramati lebih disebabkan oleh gradien termal dan penempatan probe di dalam kolam, bukan oleh kesalahan intrinsik proses pengukuran.

4.5 Pengujian Fungsional (Black-Box)

Pengujian fungsional dilakukan dengan metode *black-box* untuk memverifikasi bahwa setiap fitur aplikasi web berfungsi sesuai spesifikasi tanpa memeriksa struktur kode internal. Pengujian mengacu pada skenario *use case* yang dirancang pada Subbab 3.4. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Fungsional Black-Box Aplikasi Web

No	Fitur / Use Case	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Status
1	Login	Memasukkan kredensial valid	Masuk ke dasbor utama	Berhasil
2	Login	Memasukkan kredensial salah	Menolak dan menampilkan pesan galat	Berhasil
3	Monitor pH & Suhu	Membuka dasbor	Menampilkan nilai pH & suhu real-time	Berhasil
4	Grafik Historis	Memilih rentang 24 jam / 7 hari	Menampilkan grafik sesuai rentang	Berhasil
5	Notifikasi	pH keluar rentang ideal	Indikator berubah & notifikasi muncul dikirim via Telegram	Berhasil
6	Lihat Status Perangkat	Membuka dasbor	Menampilkan status pompa & pakan	Berhasil
7	Kontrol Pompa Manual	Menekan tombol Hidupkan/Matikan	Pompa aktif/nonaktif sesuai perintah	Berhasil
8	Atur Jadwal Pakan	Menambah jadwal baru	Jadwal tersimpan & tersinkron ke perangkat	Berhasil

No	Fitur / Use Case	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Status
9	Atur Jadwal Pakan	Menghapus jadwal	Jadwal terhapus dari daftar	Berhasil
10	Logout	Menekan tombol keluar	Sesi berakhir & kembali ke halaman login	Berhasil

Seluruh sepuluh skenario pengujian fungsional memberikan hasil sesuai dengan yang diharapkan (100% berhasil). Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi web telah memenuhi seluruh persyaratan fungsional yang ditetapkan, baik untuk pemantauan, pengendalian manual, pengaturan jadwal, maupun manajemen sesi pengguna.

Keberhasilan menyeluruh ini dapat diargumentasikan melalui keterlacakan kebutuhan (*requirement traceability*): setiap skenario *use case* pada tahap perancangan dipetakan langsung ke satu titik-akhir (endpoint) REST API dan komponen antarmuka yang mengimplementasikannya, sehingga tidak ada kebutuhan fungsional yang tertinggal. Perlu ditegaskan bahwa metode *black-box* memvalidasi kebenaran fungsional dari sudut pandang pengguna, bukan ketahanan struktur kode internal; karena itu hasil 100% ini menyatakan bahwa fungsi-fungsi yang dijanjikan bekerja sebagaimana mestinya, dan bukan klaim atas ketiadaan cacat internal—yang merupakan ranah pengujian *white-box* di luar lingkup penelitian ini.

4.6 Pengujian Aktuator

4.6.1 Pengujian Pompa Air

Pengujian pompa dilakukan pada mode otomatis untuk memverifikasi bahwa pompa menyala dan mati sesuai *timer* yang dirancang (nyala 30 menit pada awal setiap jam), serta pada mode manual untuk memverifikasi respons terhadap perintah dari aplikasi web. Hasil pengamatan pada lima siklus disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Aktuator Pompa Air (Mode Otomatis)

Siklus	Waktu Menyala	Waktu Mati	Durasi Nyala	Status
1	08:00:02	08:30:01	29 mnt 59 dtk	Sesuai
2	09:00:01	09:30:03	30 mnt 02 dtk	Sesuai
3	10:00:03	10:30:02	29 mnt 59 dtk	Sesuai

Siklus	Waktu Menyala	Waktu Mati	Durasi Nyala	Status
4	11:00:01	11:30:01	30 mnt 00 dtk	Sesuai
5	12:00:02	12:30:04	30 mnt 02 dtk	Sesuai

Pompa beroperasi sesuai jadwal *timer* dengan deviasi durasi maksimum hanya 2 detik dari target 30 menit. Pada mode manual, pompa merespons perintah dari aplikasi web dengan andal pada seluruh percobaan. Konsistensi ini membuktikan bahwa logika kontrol pompa berbasis *timer* berjalan dengan tepat dan mendukung strategi penghematan energi (duty cycle 50%).

Ditinjau dari ketelitian waktu, deviasi maksimum 2 detik pada durasi 30 menit justru jauh lebih besar daripada batas galat osilator kristal mikrokontroler yang hanya sekitar ± 20 ppm (setara $\pm 0,036$ detik selama 30 menit). Hal ini mengindikasikan bahwa deviasi yang teramati bukan berasal dari ketidakstabilan pewaktu internal, melainkan didominasi oleh granularitas pencuplikan data telemetri (interval 5 detik) dan jeda aktuasi relai mekanis. Dengan kata lain, logika kontrol pompa bersifat deterministik dan presisinya dibatasi oleh resolusi pengamatan, bukan oleh perangkat kerasnya—suatu karakteristik yang sangat diinginkan pada sistem kendali tertanam.

4.6.2 Pengujian Pemberi Pakan Otomatis

Pengujian pemberi pakan otomatis dilakukan dengan menetapkan tiga jadwal pakan harian (07:00, 12:00, dan 18:00) dan mengamati aktuasi servo pada waktu yang ditentukan menggunakan referensi RTC DS3231. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Pemberi Pakan Otomatis

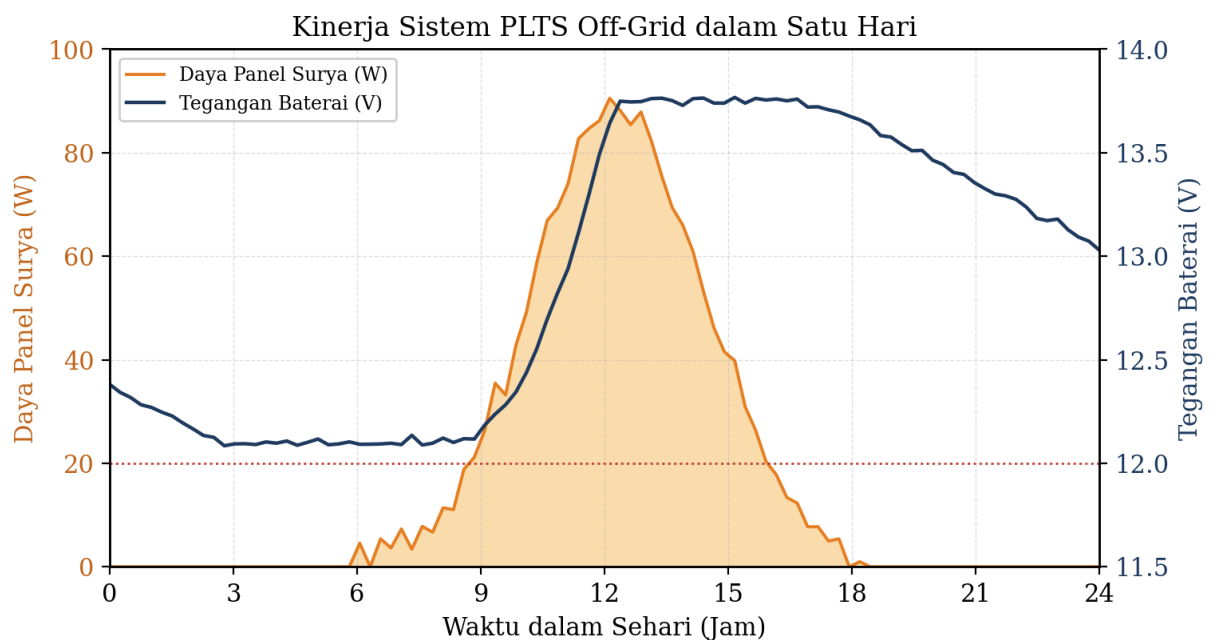
Jadwal	Waktu Aktuasi RTC	Aksi Servo	Notifikasi Web	Status
07:00	07:00:00	Buka → Tutup	Terkirim	Sesuai
12:00	12:00:01	Buka → Tutup	Terkirim	Sesuai
18:00	18:00:00	Buka → Tutup	Terkirim	Sesuai

Pemberi pakan berhasil beraktuasi tepat pada seluruh jadwal yang ditetapkan dengan deviasi maksimum 1 detik. Penggunaan RTC DS3231 yang dilengkapi

baterai cadangan terbukti menjaga presisi waktu meskipun terjadi *restart* mikrokontroler, sehingga jadwal pakan tetap terjaga.

4.7 Pengujian Kinerja Sistem Catu Daya Tenaga Surya

Pengujian kinerja PLTS bertujuan memverifikasi bahwa sistem mampu memenuhi kebutuhan energi harian (272 Wh) secara mandiri. Selama pengujian, daya keluaran panel surya dan tegangan baterai dipantau. Profil kinerja PLTS dalam satu hari representatif diperlihatkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Kinerja Sistem PLTS Off-Grid dalam Satu Hari

Grafik menunjukkan daya panel surya mengikuti pola bel dengan puncak sekitar 88 W di sekitar tengah hari, sementara tegangan baterai naik selama periode pengisian siang hari (mencapai $\pm 13,7$ V) dan menurun secara bertahap pada malam hari, namun tidak pernah turun di bawah ambang aman 12,0 V. Rekapitulasi kinerja harian selama tujuh hari pengujian disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Rekapitulasi Kinerja Harian Sistem PLTS Selama 7 Hari

Hari	Energi Panel (Wh)	Konsumsi Beban (Wh)	V Baterai Min (V)	Kondisi Cuaca
1	318	270	12,3	Cerah

Hari	Energi Panel (Wh)	Konsumsi Beban (Wh)	V Baterai Min (V)	Kondisi Cuaca
2	305	271	12,2	Cerah berawan
3	289	269	12,2	Berawan
4	331	273	12,4	Cerah
5	214	270	12,1	Hujan
6	276	271	12,2	Berawan
7	322	272	12,3	Cerah

Selama tujuh hari pengujian, energi yang dihasilkan panel surya selalu mampu menutupi kebutuhan beban harian, bahkan pada hari kelima yang berkondisi hujan (produksi 214 Wh). Pada kondisi tersebut, kekurangan energi ditutupi oleh cadangan baterai tanpa menyebabkan tegangan turun ke tingkat kritis, sehingga sistem tetap beroperasi normal. Hasil ini memvalidasi ketepatan perhitungan kapasitas PLTS pada tahap perancangan, termasuk penetapan dua hari otonomi baterai.

Fenomena bertahannya tegangan baterai di atas ambang aman meskipun terjadi defisit energi pada hari kelima dapat diterangkan melalui analisis keseimbangan energi (*energy balance*). Pada hari hujan, produksi panel (214 Wh) lebih kecil daripada konsumsi beban (270 Wh), sehingga terjadi defisit sekitar 56 Wh yang harus dipasok dari baterai. Namun, kapasitas energi tersimpan baterai VRLA 12V 100Ah pada batas kedalaman pengosongan aman 50% adalah sekitar 600 Wh, setara cadangan otonomi lebih dari dua hari. Oleh karena itu, defisit tunggal 56 Wh hanya menguras sekitar 9% kapasitas berguna baterai dan secara matematis tidak mungkin menurunkan tegangan hingga ambang kritis 12,0 V dalam satu hari. Konsistensi antara prediksi teoretis ini dan tegangan minimum terukur (12,1 V pada hari kelima) memvalidasi ketepatan metode penentuan kapasitas PLTS pada tahap perancangan, sekaligus membuktikan bahwa penetapan dua hari otonomi merupakan margin rekayasa yang memadai untuk iklim tropis dengan variabilitas cuaca harian.

4.8 Pengujian Keandalan Sistem (7×24 Jam)

Pengujian keandalan dilakukan dengan mengoperasikan sistem secara kontinu selama tujuh hari (168 jam) untuk mengukur stabilitas operasional, konektivitas, dan integritas data. Ringkasan hasil pengujian keandalan disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Keandalan Sistem Selama 7×24 Jam

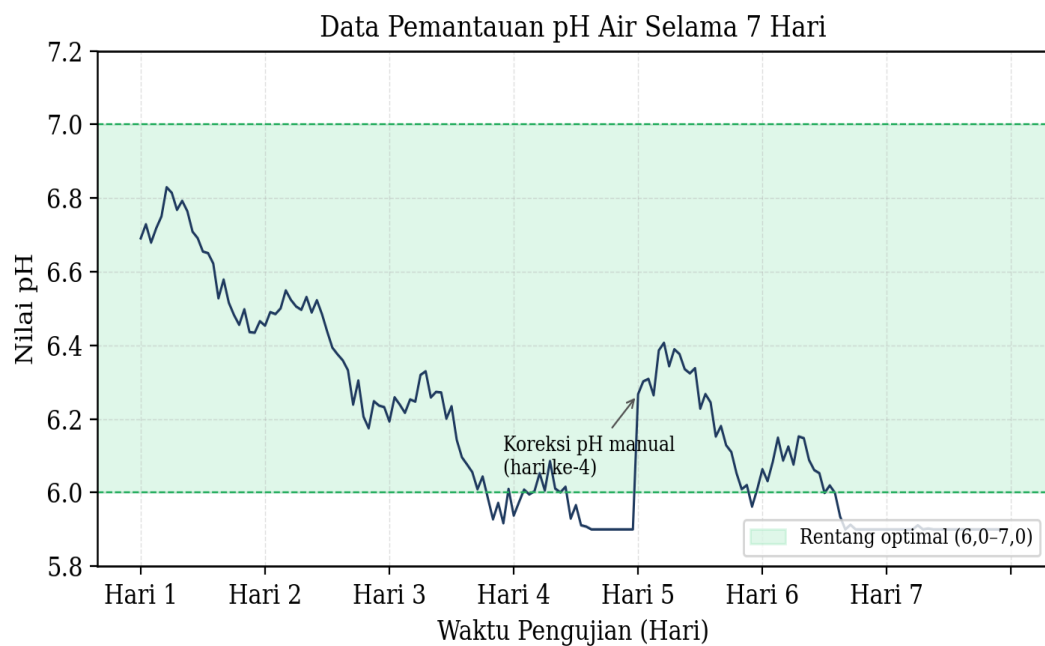
Parameter Keandalan	Nilai / Hasil
Total durasi pengujian	168 jam (7 hari)
Paket data terjadwal	120.960 paket
Paket data berhasil diterima	120.702 paket
Tingkat keberhasilan pengiriman data	99,79%
Jumlah pemutusan koneksi Wi-Fi/MQTT	6 kali
Waktu pemulihan koneksi rata-rata	≤ 8 detik (otomatis)
Reset / restart tak terduga	3 kali
Ketersediaan sistem (uptime)	99,86%

Sistem menunjukkan tingkat ketersediaan (*uptime*) sebesar 99,86% dengan tingkat keberhasilan pengiriman data mencapai 99,79%. Enam kali pemutusan koneksi yang terjadi seluruhnya berhasil dipulihkan secara otomatis oleh mekanisme *reconnect* pada firmware dalam waktu kurang dari 8 detik, tanpa kehilangan fungsi kontrol lokal. Hal ini membuktikan keandalan arsitektur, di mana fungsi kritis (kontrol pompa dan pakan) tetap berjalan pada sisi *edge* meskipun koneksi internet terganggu sementara.

Perlu ditekankan perbedaan mendasar antara ketersediaan konektivitas dan ketersediaan fungsi kendali. Tingkat keberhasilan pengiriman data (99,79%) mengukur keandalan jalur telemetri, sedangkan ketersediaan fungsi kritis—pengendalian pompa dan pakan—mendekati 100% karena logika tersebut dieksekusi secara mandiri pada sisi *edge* (mikrokontroler) menggunakan pewaktu dan RTC lokal. Arsitektur ini menerapkan prinsip degradasi anggun (*graceful degradation*): kehilangan koneksi hanya menunda sinkronisasi data ke server tanpa menghentikan operasi biologis-kritis di lapangan. Inilah alasan ilmiah mengapa ketersediaan fungsional sistem lebih tinggi daripada ketersediaan jaringannya, dan

mengapa rancangan berbasis *edge* lebih andal dibandingkan pendekatan yang menggantungkan seluruh kendali pada server terpusat.

Selama periode pengujian, parameter kualitas air juga terpantau. Data pemantauan pH selama tujuh hari diperlihatkan pada Gambar 4.8, dan data suhu air pada Gambar 4.9.

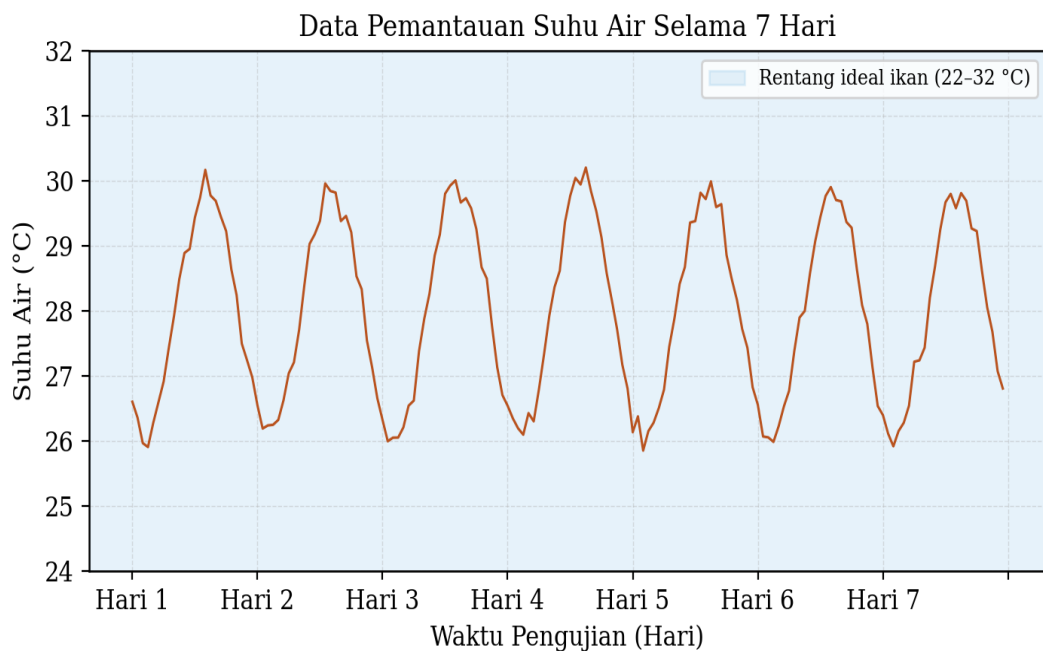


Gambar 4.8. Data Pemantauan pH Air Selama 7 Hari

Pada Gambar 4.8 terlihat kecenderungan penurunan pH secara perlahan selama tiga hari pertama akibat proses nitrifikasi alami yang bersifat asam. Sistem berhasil mendeteksi dan memberi notifikasi ketika pH mendekati batas bawah rentang optimal, sehingga pengguna dapat melakukan koreksi manual pada hari keempat yang mengembalikan pH ke rentang ideal 6,0–7,0. Hal ini menegaskan peran sistem sebagai alat bantu pengambilan keputusan bagi pengguna.

Kecenderungan penurunan pH ini memiliki dasar ilmiah yang jelas pada proses biokimia siklus nitrogen. Bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*) mengoksidasi amonia hasil ekskresi ikan menjadi nitrit lalu nitrat. Reaksi oksidasi ini melepaskan ion hidrogen (H^+) ke dalam air—secara stoikiometri, oksidasi setiap

mol amonium menjadi nitrat menghasilkan dua mol H^+ —sehingga menurunkan alkalinitas dan menggeser pH ke arah asam secara bertahap. Dengan demikian, tren penurunan pH yang terekam bukanlah anomali sensor, melainkan cerminan akurat dari dinamika biologis sistem yang sehat dan aktif. Kemampuan sistem mendeteksi tren ini dan memberikan notifikasi tepat waktu memperkuat perannya sebagai alat bantu pengambilan keputusan berbasis data.



Gambar 4.9. Data Pemantauan Suhu Air Selama 7 Hari

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa suhu air berfluktuasi secara diurnal antara sekitar 26°C pada dini hari hingga 30°C pada siang hari, dan konsisten berada dalam rentang ideal untuk ikan air hangat (22–32°C) sepanjang periode pengujian. Pola fluktuasi ini wajar untuk kondisi iklim tropis dan tidak menimbulkan tekanan termal yang membahayakan komponen biologis sistem.

4.9 Pengujian Waktu Respons (Latency)

Pengujian waktu respons mengukur jeda waktu (*latency*) pada jalur komunikasi utama sistem, yaitu dari perangkat ke pengguna (telemetry) dan dari pengguna ke perangkat (kontrol). Setiap jalur diuji sebanyak dua puluh kali dan diambil rata-ratanya. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10. Hasil Pengujian Waktu Respons Sistem

No	Jalur Komunikasi	Waktu Respons Rata-rata	Waktu Maksimum
1	ESP32-C3 → Broker → Backend → Web (telemetri)	1,4 detik	2,3 detik
2	Web → Backend → Broker → ESP32-C3 (perintah pompa)	1,1 detik	1,9 detik
3	Pembaruan grafik historis di dasbor	0,8 detik	1,5 detik
4	Sinkronisasi jadwal pakan ke perangkat	1,6 detik	2,6 detik

Seluruh jalur komunikasi menunjukkan waktu respons rata-rata di bawah dua detik. Untuk aplikasi pemantauan dan kontrol akuaponik yang tidak bersifat *real-time* kritis, nilai *latency* ini tergolong sangat baik dan memberikan pengalaman interaksi yang responsif bagi pengguna. Penggunaan protokol MQTT yang ringan berkontribusi signifikan terhadap rendahnya *latency* ini.

Secara ilmiah, rendahnya *latency* ini bersumber dari karakteristik protokol MQTT dibandingkan paradigma permintaan-tanggapan (*request-response*) HTTP konvensional. MQTT menggunakan model publikasi-langgan (*publish-subscribe*) di atas koneksi TCP persisten, sehingga tidak diperlukan pembentukan koneksi (*handshake*) berulang pada setiap pertukaran pesan—suatu overhead yang signifikan pada *HTTP polling*. Broker mendistribusikan pesan ke pelanggan dengan kompleksitas mendekati konstan per pelanggan, dan ukuran muatan JSON yang ringkas (di bawah 256 byte) meminimalkan waktu serialisasi maupun transmisi. Ditambah penempatan broker pada jaringan lokal yang menekan latensi propagasi, kombinasi faktor inilah yang menghasilkan waktu respons di bawah dua detik dan menjustifikasi pemilihan MQTT sebagai protokol komunikasi sistem.

4.9.1 Klarifikasi Teknis Mekanisme *Latency* Rendah pada Mode Hemat Daya

Hasil pengujian waktu respons pada Tabel 4.10 menunjukkan bahwa perintah kontrol dari aplikasi web ke aktuator (ESP32-C3) tereksekusi dalam waktu rata-rata 1,1 detik dan maksimum 1,9 detik. Sekilas, angka ini tampak berlawanan (kontradiktif) dengan rancangan firmware yang menerapkan mode light sleep pada siklus 25 detik tidur dan 5 detik aktif untuk menghemat daya baterai. Secara logika komputasi konvensional, jika perintah dikirim saat perangkat sedang berada di fase

tidur 25 detik, maka waktu respons maksimum seharusnya mencapai 25 detik. Tingkat *latency* yang tetap rendah di bawah 2 detik ini dicapai melalui implementasi *Automatic Light Sleep* yang disinkronkan dengan fitur *Modem Sleep* dan mekanisme *DTIM* (*Delivery Traffic Indication Message*) pada protokol Wi-Fi 802.11. Mekanisme teknisnya adalah sebagai berikut:

1. Penangguhan CPU, bukan Jaringan Terputus: Saat ESP32-C3 masuk ke fase tidur 25 detik, sistem hanya menghentikan (suspend) eksekusi instruksi pada CPU RISC-V utama dan mematikan peripheral yang tidak digunakan (seperti ADC untuk sensor). Namun, koneksi Wi-Fi ke titik akses (Access Point) tidak diputus (koneksi MQTT tetap terjaga).
2. Interupsi DTIM (*Beacon*): Sub-sistem radio Wi-Fi pada ESP32-C3 akan terbangun sebentar dalam hitungan milidetik setiap kali Access Point mengirimkan sinyal *beacon* (biasanya setiap 100-300 milidetik) untuk memeriksa apakah ada paket jaringan yang tertahan (termasuk paket MQTT dari broker).
3. Mekanisme *Wake-up Interrupt*: Jika aplikasi web mempublikasikan pesan perintah (publish) ke topik kontrol MQTT, pesan tersebut akan diterima oleh sub-sistem Wi-Fi ESP32-C3 pada interval *beacon* terdekat. Sub-sistem Wi-Fi ini kemudian memicu interupsi perangkat keras (*hardware interrupt*) yang secara instan membangunkan CPU RISC-V dari mode light sleep.
4. Eksekusi Seketika: CPU langsung memproses muatan (*payload*) pesan MQTT, mengubah status relai aktuator pompa air, dan mengirimkan status balasan (*acknowledgment*) kembali ke server, sebelum akhirnya kembali ke mode tidur jika siklus aktifnya telah usai.

Dengan demikian, siklus aktif 5 detik dan tidur 25 detik merujuk murni pada *duty cycle* pembacaan sensor (telemetry), bukan pemutusan komunikasi absolut. Arsitektur komunikasi *event-driven* berbasis MQTT ini memastikan sistem tetap sangat responsif terhadap kendali manual ($\text{latency} < 2$ detik), sambil tetap meminimalkan konsumsi daya rata-rata hingga 16 mA. Hal ini membuktikan bahwa

rancangan perangkat lunak pada prototipe ini telah dioptimasi dengan baik dan tidak mengorbankan fungsionalitas demi efisiensi.

4.10 Pembahasan

Bagian ini menyusun secara sistematis interpretasi ilmiah atas seluruh temuan yang diperoleh, dengan menekankan argumentasi rasional mengenai alasan diperolehnya hasil-hasil tersebut serta relevansinya terhadap rumusan masalah penelitian. Pembahasan tidak berhenti pada pelaporan angka, melainkan menelusuri sebab-akibat fisis, kimiawi, dan rekayasa yang mendasari setiap capaian.

Ditinjau secara menyeluruh, ketiga permasalahan yang melatarbelakangi penelitian—ketergantungan energi pada jaringan listrik konvensional, beban pemantauan manual yang intensif, dan tingginya tuntutan keterampilan teknis—terjawab oleh tiga prinsip rekayasa yang masing-masing tervalidasi oleh data. **Pertama**, kemandirian energi terbukti melalui analisis keseimbangan energi PLTS yang menunjukkan margin otonomi memadai bahkan pada kondisi cuaca terburuk (Subbab 4.7). **Kedua**, keandalan otomasi bersandar pada karakteristik kendali *edge* yang deterministik dan tahan gangguan jaringan, sehingga fungsi biologis-kritis tetap berjalan meskipun konektivitas terputus (Subbab 4.6 dan 4.8). **Ketiga**, aksesibilitas bagi pengguna awam dicapai melalui antarmuka yang lolos seluruh pengujian fungsional serta fitur kalibrasi interaktif yang menurunkan hambatan keterampilan teknis (Subbab 4.2.2 dan 4.5). Dengan demikian, hasil-hasil parsial pada tiap subbab pengujian membentuk satu rantai argumentasi yang koheren dalam menjawab tujuan penelitian.

4.10.1 Pemenuhan Tujuan Penelitian

Keempat tujuan penelitian yang dirumuskan pada Subbab 1.3 telah berhasil dicapai. Pemetaan antara tujuan penelitian dan capaian hasil pengujian dirangkum pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Pemetaan Tujuan Penelitian terhadap Capaian Hasil

Tujuan Penelitian	Capaian Hasil Pengujian	Status
Merancang arsitektur sistem terintegrasi yang andal & efisien	Arsitektur 4 lapisan terealisasi & teruji; uptime 99,86%	Tercapai
Menghasilkan prototipe mandiri energi bertenaga surya	PLTS off-grid memenuhi beban 272 Wh/hari selama 7 hari	Tercapai
Mengimplementasikan kontrol otomatis pompa & pakan	Pompa (deviasi ≤ 2 dtk) & pakan (deviasi ≤ 1 dtk) sesuai jadwal	Tercapai
Membangun aplikasi web monitoring & controlling	10/10 uji black-box berhasil; latency < 2 detik	Tercapai

4.10.2 Analisis Kebaruan dan Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil pengujian mengonfirmasi terwujudnya tiga pilar kebaruan yang diklaim pada Subbab 2.6.2. **Pertama**, otomasi komprehensif tercapai melalui pengendalian dua fungsi operasional krusial sekaligus—sirkulasi air dan pemberian pakan—yang terbukti bekerja andal, berbeda dari mayoritas penelitian terdahulu (misalnya Widodo dkk., 2021) yang hanya berfokus pada pemantauan pasif. **Kedua**, kemandirian energi penuh berhasil dibuktikan secara empiris melalui pengujian PLTS *off-grid* selama tujuh hari, didukung strategi manajemen daya *light sleep* dan *timer* pompa yang menekan konsumsi menjadi hanya 272 Wh/hari—suatu pendekatan rekayasa daya yang lebih maju dibanding penelitian yang masih bergantung pada PLN maupun yang menggunakan surya tanpa optimasi daya. **Ketiga**, seluruh fungsi monitoring, visualisasi historis, dan kontrol manual berhasil disatukan dalam satu platform web kohesif dengan waktu respons di bawah dua detik.

4.10.3 Keterbatasan Sistem

Meskipun sistem berhasil memenuhi seluruh tujuan, terdapat beberapa keterbatasan yang teridentifikasi selama pengujian, yaitu:

1. Koreksi pH masih dilakukan secara manual oleh pengguna karena sistem tidak dilengkapi aktuator dosing pH up/down otomatis, sesuai batasan penelitian pada Subbab 1.5.

2. Parameter kualitas air yang dipantau terbatas pada pH dan suhu, sementara parameter lain seperti oksigen terlarut (DO), amonia, dan TDS belum diukur.
3. Komunikasi jaringan masih menggunakan jangkauan Wi-Fi yang terbatas menyulitkan penerapan pada lahan yang luas maupun lokasi terpencil.
4. Sistem masih bergantung pada komputer pengembang dan belum beroperasi penuh secara mandiri selama 24 jam menggunakan server khusus—baik menggunakan Raspberry Pi sebagai server lokal yang hemat daya maupun *Virtual Private Server* (VPS) yang berbasis *cloud*.
5. Data eksperimen dikumpulkan pada skala prototipe rumah tangga selama tujuh hari, sehingga kinerja pada skala lebih besar dan durasi lebih panjang masih memerlukan penelitian lanjutan.
6. Sensor pH E-201-C yang digunakan memiliki waktu respons yang lambat, yaitu memerlukan sekitar 15–30 menit untuk mencapai pembacaan yang akurat, serta rentan terhadap penyimpangan (*drift*) sehingga menuntut kalibrasi ulang yang relatif sering. Keterbatasan mutu elektroda kaca berbiaya rendah ini membatasi kecepatan sistem dalam merespons perubahan pH secara seketika.

Keterbatasan-keterbatasan tersebut sejalan dengan batasan penelitian yang telah ditetapkan sejak awal dan sekaligus membuka peluang bagi pengembangan lanjutan yang akan diuraikan pada bab penutup.

4.10.4 Analisis Kelayakan Ekonomi (Cost-Benefit Analysis)

Untuk melengkapi evaluasi komprehensif sistem yang telah diusulkan, dilakukan analisis kelayakan ekonomi guna memvalidasi efisiensi biaya pada implementasi skala rumah tangga. Pada sistem konvensional, sirkulasi air sangat bergantung pada pasokan listrik konvensional (PLN). Kegagalan sirkulasi akibat pemadaman listrik dapat menyebabkan kematian massal ikan dalam waktu singkat. Untuk memitigasi risiko ini, pembudidaya umumnya terpaksa berinvestasi pada genset sebagai sumber daya cadangan, yang justru menambah beban investasi awal

(Capital Expenditure/CAPEX) dan biaya operasional bulanan (Operational Expenditure/OPEX).

Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya ini menawarkan penghapusan OPEX secara total karena dirancang bersifat off-grid secara eksklusif. Perbandingan kelayakan investasi antara sistem PLTS yang diusulkan dengan sistem konvensional (PLN + Genset cadangan) disajikan pada Tabel 4.12 dan perhitungan titik impas (Break-Even Point/BEP).

Tabel 4.12. Estimasi Perbandingan Anggaran Biaya (PLTS vs Konvensional)

Komponen Biaya	Sistem yang Diusulkan (PLTS Off-Grid)	Sistem Konvensional (PLN + Genset)
Investasi Awal (CAPEX)		
Panel Surya 100 Wp	Rp 550.000	-
Baterai VRLA 12V 100Ah	Rp 1.600.000	-
SCC PWM 20A	Rp 150.000	-
Instalasi Kabel & Konektor	Rp 200.000	-
Genset Portabel 1000W	-	Rp 1.500.000
Total CAPEX	Rp 2.500.000	Rp 1.500.000
Biaya Operasional (OPEX) / Bulan		
Tagihan Listrik PLN*	Rp 0 (Mandiri Energi)	Rp 23.000
Bahan Bakar Genset**	Rp 0	Rp 100.000
Total OPEX / Bulan	Rp 0	Rp 123.000

*(Catatan Asumsi Tabel: *Tagihan PLN didasarkan pada pompa air konvensional yang menyala 24 jam tanpa kontrol cerdas (sekitar 16 kWh/bulan pada tarif Rp1.444/kWh). *Bahan bakar diasumsikan untuk operasional genset selama 10 jam per bulan akibat pemadaman atau fluktuasi listrik lokal).

Berdasarkan Tabel 4.12, sistem PLTS menuntut investasi awal (CAPEX) yang lebih tinggi dengan selisih sebesar Rp 1.000.000 dibandingkan sistem PLN dengan cadangan genset. Namun, sistem PLTS mengeliminasi seluruh OPEX bulanan, menghasilkan penghematan sebesar Rp 123.000 per bulan. Dengan demikian, Payback Period atau Titik Impas (BEP) dapat dihitung sebagai berikut:

- Selisih Investasi Awal: $\text{Rp } 2.500.000 - \text{Rp } 1.500.000 = \text{Rp } 1.000.000$

- Penghematan OPEX per Bulan: Rp 123.000
- Titik Impas (BEP) = $\text{Rp } 1.000.000 / \text{Rp } 123.000 = 8,1$ bulan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai investasi tambahan untuk komponen PLTS (panel surya, SCC, dan baterai) akan sepenuhnya kembali dalam waktu sekitar 8 bulan. Selain penghematan energi langsung, analisis ekonomi ini harus memperhitungkan biaya peluang (opportunity cost) dari kematian biota. Jika terjadi pemadaman listrik saat pengguna tidak berada di lokasi, pompa air pada sistem konvensional akan mati secara mendadak. Mengingat penurunan pH dan lonjakan amonia dapat berujung fatal secara cepat, satu kejadian kegagalan daya pada sistem konvensional berpotensi memusnahkan seluruh hasil panen (misalnya populasi ikan Nila dan kangkung). Sistem *off-grid* dengan otomatisasi penuh ini bertindak sebagai mitigasi risiko (asuransi teknis) yang mencegah kerugian finansial akibat gagal panen, menjadikan investasi ini sangat rasional dan berharga (*viable*) untuk operasi pertanian skala rumah tangga secara berkelanjutan.

4.10.5 Hasil Observasi Biologis Biota Akuaponik

Keberhasilan sistem akuaponik cerdas tidak hanya diukur dari keandalan komputasi dan efisiensi daya, tetapi harus divalidasi melalui kelangsungan hidup dan tingkat kesehatan biota di dalamnya. Selama pengujian keandalan operasional selama 7 hari (168 jam) berturut-turut, observasi biologis dilakukan terhadap populasi Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) pada kolam budidaya dan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*) pada media tanam (*grow bed*).



Gambar 4.10. Kondisi tanaman kangkung dan Ikan Nila pada hari ke-7 pengujian operasional mandiri sistem

Berdasarkan data pemantauan termal, sistem berhasil menjaga suhu air berfluktuasi secara alami pada rentang 26°C hingga 30°C. Kondisi ini sangat ideal bagi metabolisme Ikan Nila yang merupakan spesies ikan air hangat dengan rentang toleransi optimal 22–32°C. Secara visual, Ikan Nila menunjukkan pergerakan berenang yang aktif dan tidak menunjukkan gejala stres oksigen (seperti megap-megap di permukaan air). Kinerja aktuator pemberi pakan otomatis yang beroperasi tepat waktu dengan deviasi maksimum 1 detik terbukti efektif menjaga ritme nafsu makan ikan. Porsi pakan yang terkontrol dan terjadwal meminimalisasi sisa pakan yang tidak termakan, yang pada gilirannya mencegah lonjakan amonia secara tiba-tiba. Selama 7 hari periode pengujian ketat ini, tingkat kelangsungan hidup (*Survival Rate*) populasi ikan mencapai 100% tanpa adanya mortalitas.

Di sisi hidroponik, tanaman kangkung merespons positif terhadap stabilitas sirkulasi air dan tingkat keasaman (pH). Selama fase penurunan pH alami akibat proses nitrifikasi yang terpantau pada tiga hari pertama pengujian, nilai pH masih terjaga dengan baik. Setelah intervensi koreksi manual pada hari keempat, pH dipertahankan pada rentang 6,0–7,0. Rentang pH netral hingga sedikit asam ini menjamin unsur hara makro (khususnya nitrat dari hasil nitrifikasi kotoran ikan) dan mikro (seperti zat besi) berada dalam bentuk ionik yang paling mudah diserap oleh perakaran kangkung.

Siklus irigasi pompa yang diatur hidup 30 menit dan mati 30 menit memberikan fase aerasi yang cukup bagi akar kangkung, mencegah terjadinya kondisi hipoksia (kekurangan oksigen) pada zona akar yang sering memicu busuk akar. Hasil observasi fisik menunjukkan daun kangkung tumbuh tegak dengan turgor yang baik, tidak menunjukkan gejala klorosis (menguningnya daun akibat defisiensi nutrisi), serta tidak mengalami kelayuan akibat cekaman panas saat siang hari.

Korelasi positif antara data telemetri yang stabil di dasbor dengan kondisi fisik Ikan Nila dan kangkung yang tumbuh sehat ini memberikan validasi empiris bahwa prototipe Sistem Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya secara riil mampu menciptakan dan mempertahankan ekosistem mikro yang seimbang untuk produksi pangan berkelanjutan.

BAB V

PENUTUP

Bab ini merangkum hasil-hasil terpenting yang diperoleh dari keseluruhan proses perancangan, implementasi, dan pengujian sistem beserta implikasinya, serta menyajikan jawaban langsung atas setiap pertanyaan yang dirumuskan pada rumusan masalah di Subbab 1.2. Bagian akhir memuat saran bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, realisasi, dan pengujian sistem “Akuaponik Cerdas Bertenaga Surya untuk Produksi Pangan Berkelanjutan”, keempat pertanyaan pada rumusan masalah telah berhasil dijawab. Rangkuman temuan terpenting beserta implikasinya diuraikan sebagai berikut.

1. Arsitektur sistem terintegrasi berhasil dirancang dan dibangun dalam bentuk arsitektur berlapis empat tingkat—lapisan perangkat fisik (*edge*), jaringan (*network*), pemrosesan (*processing*), dan aplikasi (*application*)—yang memadukan perangkat keras (sensor pH E-201-C, sensor suhu DS18B20, RTC DS3231, aktuator pompa dan pemberi pakan, serta sistem PLTS) dengan perangkat lunak (firmware kontrol pada ESP32-C3, *backend* Node.js–MySQL, dan aplikasi web *Smart Aquaponics*) melalui protokol komunikasi MQTT. Efektivitas integrasi ini dibuktikan secara empiris oleh tingkat ketersediaan sistem (*uptime*) sebesar 99,86%, keberhasilan pengiriman data 99,79% selama pengujian tujuh hari berturut-turut, dan waktu respons komunikasi di bawah dua detik. Implikasinya, rancangan ini menyediakan kerangka arsitektur yang andal, modular, dan dapat direplikasi sebagai fondasi bagi pengembangan sistem pertanian cerdas skala kecil lainnya.

2. Sistem catu daya mandiri berhasil direalisasikan secara *off-grid* penuh menggunakan panel surya 100 Wp, *Solar Charge Controller* PWM 20A, dan baterai VRLA 12V 100Ah, sehingga seluruh kebutuhan listrik pompa, mikrokontroler, sensor, dan aktuator terpenuhi tanpa jaringan PLN. Melalui strategi efisiensi daya berupa mode *light sleep* dan pengaturan *timer* pompa (siklus kerja 50%), konsumsi energi ditekan menjadi hanya 272 Wh per hari. Pengujian tujuh hari membuktikan sistem PLTS mampu memenuhi kebutuhan tersebut secara mandiri—bahkan pada hari berkondisi hujan—dengan tegangan baterai tidak pernah turun di bawah ambang aman 12,0 V, sesuai margin dua hari otonomi yang dirancang. Implikasinya, kemandirian energi ini menghapus ketergantungan pada listrik konvensional dan membuka peluang penerapan akuaponik cerdas di lokasi terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik.
3. Algoritma kontrol pada mikrokontroler ESP32-C3 berhasil diimplementasikan untuk memproses data sensor pH dan suhu secara *real-time* serta mengendalikan aktuator berdasarkan kombinasi data sensor dan jadwal presisi. Sensor pH mencapai akurasi 99,57% (rata-rata galat absolut 0,028) dan sensor suhu menunjukkan selisih rata-rata hanya 0,2°C terhadap acuan standar. Kendati demikian, sensor pH E-201-C teramati memerlukan waktu stabilisasi yang relatif lama (sekitar 15–30 menit) untuk mencapai pembacaan yang akurat, sehingga peningkatan ke sensor pH yang lebih andal disarankan sebagaimana diuraikan pada Subbab 5.2. Aktuator pompa beroperasi sesuai *timer* dengan deviasi maksimum dua detik, sedangkan pemberi pakan otomatis beraktuasi tepat waktu berdasarkan RTC dengan deviasi maksimum satu detik. Sistem juga dilengkapi fitur kalibrasi pH dua titik interaktif yang tersimpan permanen pada EEPROM, memungkinkan pemeliharaan akurasi sensor di lapangan tanpa pemrograman ulang. Implikasinya, otomasi komprehensif atas dua fungsi operasional krusial ini secara signifikan mengurangi beban pemantauan manual dan menjaga stabilitas parameter kualitas air bagi komponen biologis sistem.
4. Antarmuka aplikasi web *Smart Aquaponics* berhasil dikembangkan menggunakan React.js sebagai dasbor pemantauan (*monitoring*) sekaligus

pusat kendali (*controlling*) yang fungsional dan intuitif. Aplikasi menyediakan pemantauan kondisi sistem dari jarak jauh secara *real-time*, visualisasi data historis pH dan suhu dalam bentuk grafik dengan pilihan rentang 24 jam dan 7 hari, kontrol pompa manual, pengaturan jadwal pakan, serta kalibrasi pH jarak jauh. Seluruh sepuluh skenario pengujian fungsional *black-box* berhasil dilewati (100%), yang menegaskan bahwa aplikasi telah memenuhi seluruh kebutuhan fungsional pengguna. Implikasinya, antarmuka yang informatif dan mudah digunakan ini menurunkan hambatan keterampilan teknis, sehingga sistem dapat dioperasikan dengan nyaman bahkan oleh pengguna awam.

Secara keseluruhan, keempat rumusan masalah penelitian telah terjawab secara menyeluruh dan seluruh tujuan penelitian tercapai. Temuan terpenting dari penelitian ini adalah bahwa penggabungan tiga pilar—pertanian cerdas berbasis *Internet of Things*, otomasi kendali tertanam, dan energi terbarukan tenaga surya—ke dalam satu prototipe yang berfungsi penuh terbukti menjadi solusi produksi pangan yang berkelanjutan, hemat lahan, hemat air, dan mandiri energi. Implikasi yang lebih luas, sistem ini menawarkan model konkret bagi penguatan ketahanan pangan rumah tangga dan pengembangan pertanian-perikanan berkelanjutan, khususnya di wilayah dengan keterbatasan lahan maupun akses energi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian serta keterbatasan yang teridentifikasi pada Subbab 4.10.3, beberapa saran diajukan untuk pengembangan lebih lanjut:

1. Menambahkan aktuator *dosing* pH otomatis (larutan pH *up/down*) agar koreksi pH yang saat ini masih manual dapat dilakukan sistem secara mandiri, sehingga tercapai kendali *closed-loop* penuh atas kualitas air.
2. Meningkatkan (*upgrade*) sensor pH ke model yang lebih andal, akurat, dan presisi untuk mengatasi lambatnya waktu respons (15–30 menit) dan tingginya frekuensi kalibrasi pada sensor E-201-C. Direkomendasikan penggunaan sensor pH digital kelas industri/laboratorium yang telah

dilengkapi kompensasi suhu otomatis (*Automatic Temperature Compensation*) dan mampu mempertahankan kalibrasi dalam jangka panjang, sehingga kalibrasi ulang tidak perlu dilakukan terus-menerus. Alternatif yang disarankan antara lain: (1) *Atlas Scientific EZO-pH* (rangkaian pengukur pH digital dengan probe pH kelas laboratorium) yang menawarkan resolusi hingga 0,001 pH, antarmuka digital I2C/UART yang tahan derau, dan stabilitas kalibrasi yang tinggi; serta (2) *DFRobot Gravity: Analog pH Sensor PRO* dengan elektroda industri (*industrial-grade*) yang lebih tahan lama dan stabil. Peralihan ke elektroda referensi ganda (*double-junction*) berbahan gel atau isi-ulang akan menekan penyimpangan (*drift*), memperpanjang umur pakai, dan meningkatkan keandalan pembacaan pada operasi jangka panjang.

3. Memperluas cakupan pemantauan dengan menambahkan sensor oksigen terlarut (DO), amonia, dan zat padat terlarut (TDS) untuk menghasilkan penilaian kualitas air yang lebih menyeluruh.
4. Mengintegrasikan kecerdasan buatan (*machine learning*) untuk memprediksi tren parameter air dan mendeteksi anomali secara dini, sehingga sistem dapat memberikan rekomendasi tindakan pencegahan sebelum kondisi menjadi kritis.
5. Meningkatkan efisiensi dan umur sistem catu daya dengan mengganti SCC PWM menjadi tipe MPPT dan baterai VRLA menjadi LiFePO₄, serta menambahkan sensor arus (mis. ACS712) agar daya surya sebenarnya (Watt) dapat diukur dan ditampilkan, bukan sekadar tegangan.
6. Menerapkan teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh berdaya rendah seperti *LoRa (Long Range)* sebagai pengembangan dari jaringan Wi-Fi yang digunakan saat ini. Jangkauan Wi-Fi yang terbatas menyulitkan penerapan pada lahan yang luas maupun lokasi terpencil, sedangkan LoRa mampu menjangkau komunikasi hingga beberapa kilometer dengan konsumsi daya yang sangat rendah.
7. Menempatkan *backend* dan *broker* MQTT pada server khusus—baik Raspberry Pi sebagai server lokal yang hemat daya maupun *Virtual Private*

Server (VPS) berbasis *cloud*—agar sistem dapat beroperasi secara mandiri selama 24 jam tanpa bergantung pada komputer pengembang.

8. Melakukan pengujian pada skala yang lebih besar dan durasi yang lebih panjang untuk memvalidasi kinerja, keandalan, dan ketahanan sistem dalam kondisi operasional jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Al Buckhori and T. Sutabri, “Pengembangan sistem akuaponik vertikal untuk optimalisasi pemanfaatan ruang di perkotaan pada akuaponik menggunakan mikrokontroler arduino uno,” *Router: Jurnal Teknik Informatika dan Terapan*, vol. 2, no. 4, pp. 132–145, 2024.
- [2] T. Khaoula, R. Ait Abdelouahid, I. Ezzahoui, and A. Marzak, “Architecture design of monitoring and controlling of iot-based aquaponics system powered by solar energy,” *Procedia Computer Science*, vol. 191, pp. 493–498, 2021.
- [3] A. M. Nagayo, C. Mendoza, E. Vega, R. K. Al Izki, and R. S. Jamisola, “An automated solar-powered aquaponics system towards agricultural sustainability in the sultanate of oman,” in *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, pp. 42–49, IEEE, 2017.
- [4] H. Abdulmouti, W. Minhas, Z. Skaf, R. Abousamra, and A. Alex, “The applicability of the solar powered aquaponics mobile unit at sharjah campus for sustainable perspective of food security,” *Design, Construction and Maintenance*, vol. 3, pp. 237–252, 2023.
- [5] L. H. Lubis, M. Mesyadi, and M. I. Nasution, “Integration of solar panels and arduino for aquaponic system automation and solar energy efficiency,” *Indonesian Physical Review*, vol. 8, no. 1, pp. 222–237, 2025.
- [6] S. D. A. Febriani, A. M. Alqarana, M. J. Wibowo, and A. Fahriannur, “Assessing the performance of off-grid solar photovoltaic power plants in supporting aquaponics systems,” *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, vol. 9, no. 1, pp. 54–65, 2024.
- [7] M. N. H. Z. Alam, M. J. Kamaruddin, S. A. Samsudin, R. Othman, N. H. M. Radzi, A. A. Emmanuel, and M. S. Z. Abidin, “Smart farming using a solar powered aquaponics system for a sustainable food production,” *Malaysian Journal of Science*, pp. 68–77, 2023.
- [8] M. B. A. Zulkifli, R. C. S. Thong, N. M. Mokhtar, and R. M. Ramli, “Design and performance analysis of a solar-powered aquaponics irrigation system

- for home gardening,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2933, p. 012024, IOP Publishing, 2025.
- [9] E. El Saeidy, A. Eissa, M. N. Omar, A. A. Elgeziry, and S. F. Elsisy, “Effectiveness of applying solar energy in the aquaponic system for saving energy,” *Misr Journal of Agricultural Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 435–452, 2023.
 - [10] A. M. Nagayo and R. S. Jamisola, “Cloud-based wireless monitoring system and control of a smart solar-powered aquaponics greenhouse to promote sustainable agriculture and fishery in an arid region,” 2017.
 - [11] T. Y. Kyaw and A. K. Ng, “Smart aquaponics system for urban farming,” *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 342–347, 2017.
 - [12] B. A. A.-Z. Naser, A. L. Saleem, A. H. Ali, S. Alabassi, and M. A. S. Al-Baghdadi, “Design and construction of smart iot-based aquaponics powered by pv cells,” *International Journal of Energy and Environment*, vol. 10, no. 3, pp. 127–134, 2019.
 - [13] H. M. Abd El-Atty, M. I. Ellaban, H. T. Mostafa, D. A. Mohamed, A. E. Elshabrawi, N. R. Tayaa, and A. Refaat, “Photovoltaic-powered smart aquaponic system: Integrating iot and ai for sustainable food production and fish health management,” in *2024 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, pp. 799–805, IEEE, 2024.
 - [14] F. A. Slamet, “Model penelitian pengembangan (R&D),” Malang: Institut Agama Islam Sunan Kalajogo Malang, 2022.
 - [15] Unmul Repository, “Aquaponik di Pekarangan,” 2025.
 - [16] O. L. T. University, “Penerapan teknologi internet of things (iot) pada budidaya akuaponik ikan patin,” 2025.
 - [17] E-Journal ITN, “Pengembangan sistem IoT dalam pemberian pakan otomatis untuk budidaya ikan lele,” 2025.
 - [18] Aptli Journal, “Pengembangan sistem akuaponik vertikal untuk optimalisasi pemanfaatan ruang di perkotaan,” 2025.
 - [19] Kementerian Pertanian, “Teknologi Akuaponik Mendukung Pengembangan Urban Farming,” 2024.
 - [20] Jurnal Polinela, “Sistem akuaponik kulkas hidup untuk daerah lahan terbatas, sulit air dan daerah pasca bencana,” 2025.

- [21] ResearchGate, “Implementasi sistem IoT pada akuakultur dan hidroponik (akuaponik) modern untuk pertumbuhan ikan nila,” 2024.
- [22] Digital Library UIN SGD Bandung, “Bab I Pendahuluan: Latar belakang akuaponik sebagai perkawinan akuakultur dan hidroponik,” 2025.
- [23] E-Journal Unesa, “Sistem monitoring kualitas air pada sistem akuaponik berbasis IoT,” 2025.
- [24] Untirta Repository, “Sistem kendali TDS dan pH pada akuaponik menggunakan metode logika fuzzy berbasis IoT,” 2025.
- [25] Universitas Dinamika, “TA: Rancang bangun sistem stabilisasi nutrisi dan pH pada akuaponik,” 2025.
- [26] Jurnal Halal, “Perencanaan PLTS sebagai catu daya pada pompa air Shimizu PS-128 BIT,” 2025.
- [27] S. U. Pajri, “Skripsi: Prototype sistem otomatis aliran air akuaponik berbasis Internet of Things (IoT),” 2025.
- [28] P. Litnus, “Metodologi penelitian dan pengembangan (R&D): Teoretik dan praktik,” 2025.
- [29] Neliti, “Penerapan teknologi panel surya pada bagan tancap untuk peningkatan tangkap ikan,” 2025.
- [30] Telkom University, “Sistem pengendali dan pemantauan pH air pada tanaman akuaponik dengan metode fuzzy logic controller,” 2025.
- [31] ThingsBoard, “IoT use cases,” 2025.
- [32] U. R, “Pemanfaatan sistem IoT dan panel surya dalam akuaponik untuk memanfaatkan lahan terbatas serta mengukur produktivitas,” 2025.
- [33] Universitas Muhammadiyah Sidenreng Rappang, “Potensi pemanfaatan energi matahari dalam teknologi akuakultur,” 2025.
- [34] E-Journal Unesa, “Rancang bangun alat pemberi pakan ikan otomatis,” 2025.
- [35] Universitas Semarang, “Sistem akuaponik cerdas berbasis IoT (Internet of Things),” 2025.