

Implementasi Teknologi IoT dalam Sistem Akuaponik dan Akuakultur Modern untuk Optimasi Pertumbuhan Ikan Lele

Asep Syaputra^{1,*}, Nanda S. Prawira²

Program Studi Teknik Informatika, Intitut Teknologi Pagar Alam, Indonesia

¹asepsyaputra68@itpa.ac.id; ²nanda.s.prawira@gmail.com

* penulis korespondensi

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel

Diterima: 3 Desember 2024

Direvisi: 19 Desember 2024

Diterbitkan: 31 Desember 2024

Kata Kunci

Akuakultur

Akuaponik

IoT

Optimasi Pertumbuhan Ikan

ABSTRAK

Di era modern, sistem pertanian dan budidaya ikan berkembang pesat, termasuk akuaponik modern sebagai metode inovatif dan berkelanjutan yang mengintegrasikan budidaya ikan dan pertanian dalam satu sistem. Akuaponik modern efektif mengatasi keterbatasan lahan perkotaan, menjadi solusi efisien untuk produksi pangan. Penelitian ini bertujuan menerapkan sistem *Internet of Things (IoT)* pada akuaponik modern untuk meningkatkan pertumbuhan ikan lele secara terkontrol dan efisien. Sistem ini menggunakan sensor IoT, seperti sensor pH, TDS, dan suhu, untuk memantau kualitas air secara berkelanjutan. Pemantauan ini memastikan kondisi ideal untuk pertumbuhan ikan dan meningkatkan produktivitas tanaman, sehingga budidaya menjadi lebih optimal dan berkelanjutan. Hasil pengujian menunjukkan pH air sebesar 7,2, TDS 300 ppm, dan suhu air 28°C, yang semuanya berada dalam rentang optimal untuk mendukung pertumbuhan ikan lele sehat. Kondisi ini menciptakan lingkungan stabil yang ideal untuk keberhasilan sistem akuaponik.

PENDAHULUAN

Budidaya ikan air tawar dan pembesaran umumnya memerlukan ruang yang cukup luas untuk berkembang. Namun, seiring dengan meningkatnya permintaan pangan, keterbatasan lahan di daerah perkotaan menjadi tantangan besar bagi masyarakat kota yang kesulitan dalam melakukan aktivitas berkebun maupun beternak ikan. Salah satu solusi yang efektif untuk mengatasi masalah lahan terbatas ini adalah dengan menerapkan sistem akuaponik, yang menggabungkan budidaya ikan dan tanaman dalam satu sistem yang efisien dan ramah lingkungan. Sistem akuaponik didasarkan pada prinsip pemanfaatan limbah dari ikan, seperti kotoran dan sisa pakan, sebagai sumber nutrisi bagi tanaman [1]. Nutrisi ini diserap oleh tanaman, yang pada gilirannya membersihkan dan memurnikan air sebelum dikembalikan ke sistem untuk digunakan kembali oleh ikan. Proses ini menciptakan ekosistem yang saling menguntungkan, di mana ikan dan tanaman saling mendukung dalam satu siklus berkelanjutan.

Salah satu tantangan utama yang dihadapi di perkotaan adalah masalah ketahanan pangan, yang dapat diatasi dengan memanfaatkan sistem akuaponik sebagai solusi untuk menghasilkan pangan secara berkelanjutan meskipun di lahan yang terbatas [2]. Berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 17/PERMEN-KP/2020 tentang Rencana Strategis Kementerian Kelautan dan Perikanan untuk Tahun 2020-2024, target konsumsi ikan per kapita ditetapkan sebesar 56,39 kilogram pada tahun 2020, dan meningkat menjadi 58,08 kilogram pada tahun 2021 [3]. Peningkatan tersebut mencerminkan adanya kesadaran yang lebih tinggi di kalangan masyarakat mengenai pentingnya konsumsi ikan sebagai sumber protein bergizi. Hal ini juga menunjukkan bahwa

ikan semakin dipandang sebagai bahan pangan yang esensial untuk mendukung pola makan sehat dan seimbang, baik bagi individu maupun keluarga.

Untuk mencapai target tersebut, dibutuhkan upaya yang signifikan untuk memastikan pasokan ikan yang cukup dan terjangkau bagi seluruh lapisan masyarakat, terutama di daerah-daerah yang tidak memiliki akses langsung ke wilayah tangkap ikan seperti laut atau perairan terbuka. Keterbatasan akses ini mengharuskan adanya alternatif sumber pasokan ikan yang dapat diandalkan dan berkelanjutan. Oleh karena itu, solusi yang dapat diharapkan adalah melalui pengembangan budidaya ikan air tawar, yang dapat dilakukan baik melalui sistem pemeliharaan ikan dalam empang tradisional maupun dengan pendekatan yang lebih modern seperti akuaponik. Sistem akuaponik, selain efisien dalam penggunaan lahan, juga memungkinkan untuk menghasilkan ikan dan tanaman secara bersamaan, yang dapat mendukung ketahanan pangan serta meningkatkan ketersediaan pangan lokal secara lebih berkelanjutan.

Ikan lele adalah salah satu jenis ikan yang sangat ideal untuk dibudidayakan dalam sistem akuaponik, karena selain mudah diproduksi, harganya juga relatif terjangkau. Ikan lele memiliki kandungan nutrisi yang sangat baik untuk kesehatan manusia, termasuk protein, karbohidrat, lemak, kalsium, fosfor, dan zat besi. Karena nilai gizinya yang tinggi, ikan lele menjadi komoditas unggulan dalam program pertanian nasional [4]. Dalam sistem akuaponik, ikan lele memainkan peran penting dalam menyediakan unsur nitrogen (N) dan fosfor (P) melalui feses dan sisa pakan yang tidak tercerna. Proses alami dalam sistem akuaponik melibatkan peran bakteri yang mengubah sisa pakan dan feses ikan menjadi nitrat, yang kemudian berfungsi sebagai sumber nutrisi utama bagi tanaman. Proses ini menciptakan siklus simbiotik antara ikan dan tanaman, mendukung keberlanjutan kedua komponen dalam akuaponik, serta meningkatkan efisiensi dalam produksi pangan [5].

Sementara itu, tanaman dalam sistem akuaponik berperan penting dalam menyaring air, dengan cara menghilangkan gas-gas beracun yang dihasilkan sebagai sisa metabolisme ikan, seperti amonia dan karbon dioksida. Proses ini sangat krusial karena air yang telah dibersihkan oleh tanaman akan kembali disirkulasikan ke dalam sistem, memberikan lingkungan yang lebih sehat bagi ikan selama masa pemeliharaan [6]. Selama budidaya ikan, ikan menghasilkan nitrogen dalam bentuk berbagai senyawa seperti amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrit ($\text{NO}_2\text{-N}$), dan nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$), yang semuanya berperan dalam siklus nutrisi tanaman. Ikan mengeluarkan sekitar 80-90% amonia melalui proses osmoregulasi, sementara sisanya, sekitar 10-20%, dilepaskan dalam bentuk feses dan urin, yang juga mengandung total amonia-nitrogen (TAN). Total amonia-nitrogen ini terdiri dari dua bentuk utama: amonia tak terionisasi (NH_3), yang bersifat toksik pada tingkat tinggi, dan amonia terionisasi (NH_4), yang lebih aman bagi ikan. Kedua bentuk amonia ini adalah hasil dari proses metabolisme protein yang terjadi dalam tubuh ikan, dan pengelolaan yang tepat terhadap kandungan amonia ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem akuaponik yang sehat, di mana ikan dan tanaman saling mendukung untuk tumbuh dan berkembang dengan optimal [7].

Selain keterbatasan lahan di perkotaan untuk budidaya ikan lele, petani juga menghadapi berbagai permasalahan dalam membudidayakan ikan lele, baik dalam skala besar maupun menggunakan sistem akuaponik. Salah satu masalah utama adalah ketidakstabilan suhu air tawar yang menghambat pertumbuhan ikan lele. Selain itu, kestabilan tingkat partikel terlarut (TDS), pH air, dan kekeruhan air juga berperan penting dalam mempengaruhi laju pertumbuhan ikan lele. Faktor-faktor ini secara langsung memengaruhi kualitas lingkungan air, yang diperlukan untuk memastikan kesehatan ikan dan mencegah gangguan yang dapat menghambat pertumbuhan mereka. Ketiga faktor ini berpengaruh langsung terhadap kualitas lingkungan hidup ikan, yang

pada gilirannya dapat memengaruhi kesehatan dan perkembangan ikan lele [8]. Kondisi air yang optimal, dengan pH yang seimbang, kadar partikel terlarut yang tepat, dan kejernihan air yang cukup, mendukung proses metabolisme ikan secara efisien, sehingga mendukung pertumbuhannya secara maksimal [9].

Untuk mengatasi berbagai permasalahan yang telah dijelaskan sebelumnya, penerapan teknologi yang inovatif dan efektif sangat diperlukan untuk menyelesaikan isu-isu tersebut secara tuntas. Salah satu solusi efektif yang dapat diterapkan adalah teknologi berbasis Internet of Things (IoT), yang menyediakan sistem pemantauan dan pengendalian terintegrasi untuk mendukung pertumbuhan ikan lele dalam sistem akuaponik modern [10]. Sistem IoT ini dirancang secara teliti untuk memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time, dengan menggunakan berbagai sensor canggih yang dapat mengukur parameter penting seperti pH air, suhu air, dan kepadatan air [11]. Dengan kemampuan untuk terus memantau kondisi ini, teknologi IoT memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam mempertahankan kualitas air dan lingkungan sistem yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas sistem akuaponik [12].

Setiap perubahan dalam parameter ini dapat terdeteksi dengan cepat, dan data yang terkumpul dapat dipantau secara real-time melalui perangkat mobile seperti smartphone, yang terhubung langsung dengan aplikasi berbasis website. Dengan demikian, para pembudidaya ikan dapat melakukan pengawasan yang lebih efisien dan mengambil tindakan korektif segera jika kondisi lingkungan tidak sesuai, yang pada akhirnya akan meningkatkan produktivitas dan kesehatan ikan dalam sistem akuaponik secara keseluruhan. Dengan adanya sistem pemantauan dan pengendalian ini, para pembudidaya ikan dapat lebih mudah mengawasi kondisi air dan mengambil tindakan cepat jika terjadi ketidaknormalan, sehingga mengurangi risiko kegagalan panen. Selain teknologi IoT, sistem ini juga dilengkapi dengan fitur portabel untuk menentukan lokasi akuaponik, yang memungkinkan sistem ini ditempatkan baik di dalam maupun di luar rumah.

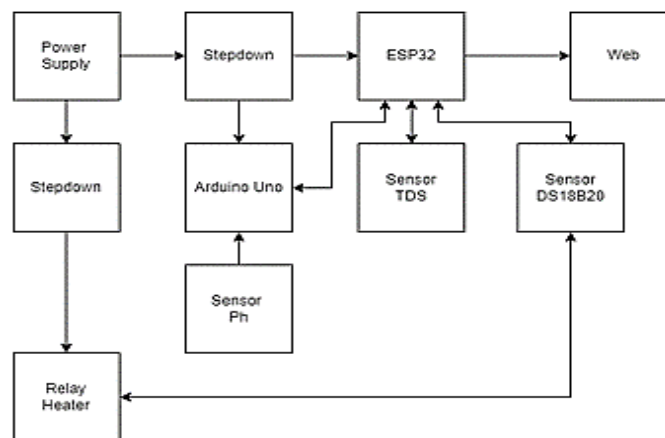
METODE

Skema Alur Penelitian

Tahap awal dalam penelitian ini adalah perancangan perangkat keras, dimulai dengan pembuatan modul *NFT (Nutrient Film Technique)*. *NFT* adalah sistem yang memanfaatkan lapisan tipis larutan nutrisi, atau 'film,' dengan ketebalan sekitar 1-3 mm. Larutan ini dipompa dan dialirkan secara terus-menerus melewati akar tanaman dengan kecepatan aliran sekitar 1-2 liter per menit. Aliran nutrisi yang stabil ini memastikan akar tanaman mendapat pasokan nutrisi yang optimal untuk pertumbuhan. Menurut S. Wibowo dan A. Asriyanti, semakin miring kemiringan talang dalam sistem *NFT*, semakin tinggi pula produktivitas tanaman [13]. Metode ini memiliki berbagai keunggulan, di antaranya mempermudah pengendalian pada area perakaran tanaman, memastikan pemenuhan kebutuhan air yang optimal, serta memungkinkan penyesuaian keseragaman dan konsentrasi larutan nutrisi sesuai dengan usia dan jenis tanaman. Metode ini juga menawarkan keunggulan dari segi biaya perawatan yang rendah, ketahanan yang lebih baik terhadap serangan hama dan penyakit, serta tidak memerlukan pemupukan khusus. Hal ini menjadikannya sebagai solusi yang efisien. Metode ini juga memiliki biaya perawatan yang rendah dan efisiensi yang tinggi dalam sistem budidaya tanaman [14]. Sementara itu, dalam komponen akuakultur, penulis mengimplementasikan metode sump filter untuk mengalirkan air ke dalam tabung ember, menggantikan penggunaan chamber sebelumnya. Setelah air mengalir ke dalam tabung ember dan melalui proses penyaringan, air yang telah disaring kemudian dipompa

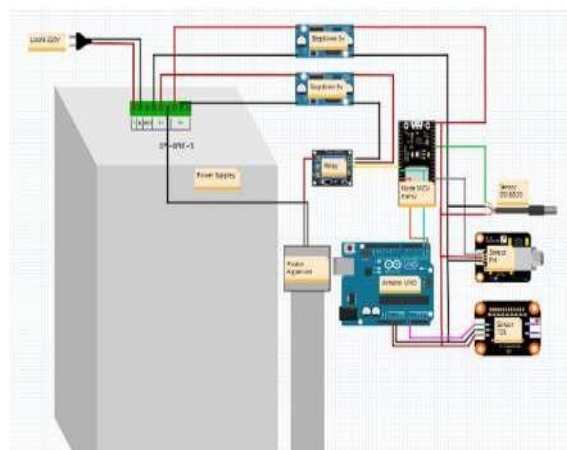
kembali dan diteruskan ke pipa akuaponik, memastikan sirkulasi air yang efisien dan menjaga kualitas air dalam sistem.

Tahapan Perangkaian Alat



Gambar 1. Diagram Blok

Representasi grafis menggambarkan secara umum alur kerja dan komponen utama dalam perancangan sistem pada penelitian ini. Diagram ini menjelaskan bagaimana setiap bagian sistem berfungsi dan saling terhubung untuk mencapai tujuan, yaitu memantau dan mengendalikan nilai pH, TDS, dan suhu air dalam sistem akuaponik. Gambar 1 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan mekanisme cara kerja alat, termasuk bagaimana sensor-sensor (pH, TDS, dan suhu) mengirimkan data ke mikrokontroler (ESP32 atau Arduino UNO), yang kemudian memproses data tersebut dan mengontrol perangkat seperti heater atau pompa untuk menjaga kondisi air tetap optimal.



Gambar 2. Rangkaian Alat

Penjelasan mengenai skematik rangkaian alat pada Gambar 2 dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. *Power Supply 12V 20A* berfungsi untuk mengonversi arus AC menjadi DC, yang dibutuhkan untuk menyediakan daya pada seluruh komponen dalam sistem.
2. *Stepdown LM2596* berfungsi sebagai penurun tegangan listrik dari 12V menjadi 5V atau 3.3V sesuai kebutuhan mikrokontroler dan sensor.
3. *NodeMCU ESP32* digunakan sebagai mikrokontroler utama yang menghubungkan sistem dengan jaringan Wi-Fi. Mikrokontroler ini juga berfungsi untuk menerima sinyal dari sensor dan mengirimkan data ke perangkat pengguna melalui internet.

4. *Arduino UNO* berfungsi untuk menerima data dari sensor pH dan mengirimkan informasi tersebut dalam format data serial ke ESP32, sehingga nilai pH dapat ditampilkan pada situs web.
5. *Relay* berfungsi sebagai saklar otomatis yang dikendalikan oleh mikrokontroler, memungkinkan pengaktifan atau penonaktifan perangkat seperti heater atau pompa air sesuai dengan kebutuhan sistem.
6. *Sensor pH* berfungsi untuk mengukur tingkat pH air dalam akuarium ikan lele, yang merupakan parameter krusial untuk menjaga kualitas lingkungan air yang mendukung kesehatan ikan.
7. *Sensor TDS* dimanfaatkan untuk mengukur konsentrasi partikel padat terlarut (ppm) dalam air akuarium ikan lele, yang berfungsi sebagai indikator penting untuk menilai kualitas air dan kesehatannya.
8. *Sensor DS18B20* dimanfaatkan untuk memantau suhu air dalam akuarium ikan lele, karena suhu air yang stabil dan berada dalam rentang yang tepat sangat penting untuk mendukung kesehatan dan kenyamanan ikan.
9. *Heater Aquarium* digunakan untuk memanaskan air akuarium guna menstabilkan suhu agar tetap berada dalam kisaran yang optimal untuk pertumbuhan ikan lele.



Gambar 3. Flowchart Proses Menampilkan Data Ke Smartphone

Penelitian ini memanfaatkan mikrokontroler ESP32 dan Arduino UNO sebagai pusat kendali utama, yang terhubung dengan berbagai sensor untuk pemantauan kondisi air dalam sistem akuaponik. Rangkaian yang akan digunakan pada alat ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu ESP32, Arduino UNO, sensor pH, sensor TDS, sensor suhu DS18B20, *heater akuarium*, *relay*, *stepdown* LM2596, dan power supply. Komponen-komponen ini saling terhubung untuk membentuk sistem yang efisien dalam memantau dan mengendalikan kondisi air dalam sistem akuaponik. ESP32 dan Arduino UNO berperan sebagai mikrokontroler utama, sedangkan sensor pH, TDS, dan suhu DS18B20 digunakan untuk memantau kualitas air. *Heater* akuarium dan relay mengatur suhu dan aliran listrik, sedangkan *stepdown* LM2596 memastikan tegangan yang stabil untuk komponen. *Power supply* menyediakan daya untuk seluruh rangkaian, dan Arduino IDE serta Fritzing digunakan untuk merancang dan memprogram sistem ini. *Flowchart* proses menampilkan data ke *smartphone* ditunjukkan pada Gambar 3.

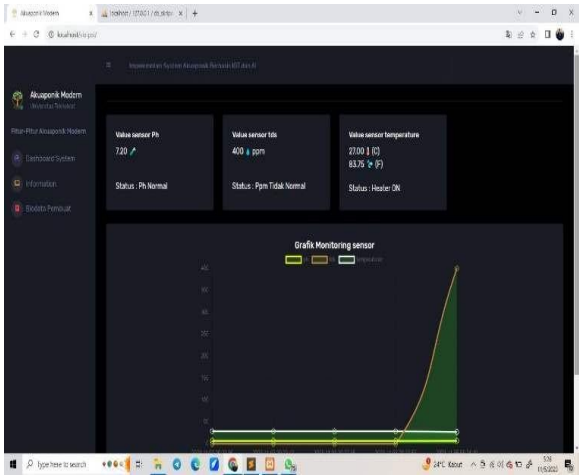
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini menyajikan hasil uji coba alat yang telah dirancang dan diimplementasikan, serta analisis untuk mengevaluasi efektivitas rancangan dan penerapannya dalam sistem akuaponik modern yang diterapkan pada lahan terbatas di kalangan masyarakat. Implementasi alat ini diharapkan dapat mengatasi tantangan keterbatasan lahan perkotaan, di mana ruang terbatas menjadi kendala utama dalam budidaya ikan dan tanaman secara bersamaan. Uji coba yang dilakukan bertujuan untuk mengukur kemampuan alat dalam memantau dan mengontrol parameter-parameter penting yang dibutuhkan dalam sistem akuaponik, seperti pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan suhu air. Data yang diperoleh dari sensor-sensor yang terintegrasi dalam sistem IoT, yang dapat dipantau secara *real-time*, akan dianalisis untuk menilai apakah sistem dapat mempertahankan kondisi optimal yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan ikan lele dan tanaman. Melalui analisis ini, penulis akan menilai sejauh mana alat tersebut berhasil menjaga kualitas lingkungan akuaponik dan memberikan insight tentang area-area yang mungkin membutuhkan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan sistem, terutama dalam memaksimalkan potensi pertanian dan budidaya ikan di lahan terbatas.



Gambar 4. Tampilan Implementasi Alat

Sensor pH memiliki peran yang sangat penting dalam memantau kondisi lingkungan dalam sistem akuaponik ikan lele, dengan memastikan bahwa nilai pH air tetap berada dalam kisaran optimal untuk mendukung pertumbuhan dan kesehatan ikan serta tanaman. Pemantauan pH secara kontinu sangat vital, karena stabilitas kualitas air secara langsung memengaruhi efektivitas dan produktivitas sistem akuaponik secara keseluruhan.



Gambar 5. Tampilan Data Sensor Pada Web

Pengujian sensor pH dilakukan selama lima hari berturut-turut, dengan pengambilan data setiap hari sekali, untuk mengevaluasi konsistensi dan stabilitas nilai pH dalam lingkungan sistem. Hasil pengujian ini, yang terperinci dalam Tabel 1, memberikan wawasan mengenai efektivitas pemantauan dan potensi kebutuhan penyesuaian pH demi optimalisasi pertumbuhan di sistem akuaponik.

Tabel 1. Hasil Uji Coba Sensor Ph

Waktu Pengukuran	Nilai pH	Kondisi Ikan	Keterangan
Hari -1	7.2	Sehat	pH dalam rentang yang ideal
Hari -2	7.5	Sehat	Sedikit peningkatan pH, namun tetap berada dalam rentang yang optimal
Hari -3	7.8	Sehat	pH terus mengalami peningkatan, sehingga diperlukan tindakan segera.
Hari -4	8.1	Ikan stres	pH terlalu tinggi, membutuhkan penurunan segera agar kembali ke level optimal.
Hari -5	7.7	Ikan pulih	pH telah disesuaikan kembali ke rentang optimal.

Sensor TDS berperan dalam mengukur kadar konsentrasi partikel padat terlarut dalam air yang digunakan untuk budidaya ikan lele, yang merupakan indikator penting bagi kualitas air dalam sistem akuaponik. Pemantauan yang cermat terhadap parameter ini sangat penting, karena kualitas air yang optimal berperan langsung dalam mendukung pertumbuhan ikan lele dan menjaga kesehatan ikan. Uji coba sensor TDS dilakukan selama lima hari berturut-turut, dengan pengambilan data dilakukan sekali setiap harinya, dan hasilnya disajikan dalam Tabel 2. Dengan pemantauan yang konsisten, diharapkan dapat menjaga kestabilan lingkungan akuarium dan meningkatkan produktivitas sistem akuaponik secara keseluruhan.

Tabel 2. Hasil Uji Coba Sensor TDS

Waktu Pengukuran	Nilai TDS (PPM)	Kondisi Ikan	Keterangan
Hari -1	300	Sehat	Nilai Rentan TDS dalam Kisaran Optimal.
Hari -2	350	Sehat	Peningkatan berada dalam rentang yang masih baik.
Hari -3	400	Sehat	Tingkat TDS mengalami peningkatan, sehingga perlu penurunan untuk mencapai kondisi optimal.
Hari -4	380	Ikan stres	Tingkat TDS mengalami penurunan dan berada dalam rentang yang baik.
Hari -5	300	Ikan pulih	Tingkat TDS telah disesuaikan kembali ke rentang yang optimal.

Sensor suhu DS18B20 memainkan peran krusial dalam memantau dan mengontrol suhu air dalam sistem akuaponik ikan lele. Sensor ini berfungsi dengan mengaktifkan pemanas (*heater*) untuk menjaga kestabilan suhu air ketika suhu turun di bawah 28°C. Pengaturan suhu yang tepat dan konsisten sangat penting dalam menjaga kualitas lingkungan akuaponik, karena suhu yang optimal mendukung metabolisme ikan dan pertumbuhan tanaman dengan lebih baik. Jika suhu air terlalu rendah atau tinggi, dapat mengganggu kesehatan ikan dan tanaman serta mengurangi efisiensi sistem akuaponik. Oleh karena itu, pengujian sensor suhu DS18B20 dilakukan selama lima hari berturut-turut untuk memastikan kinerjanya dalam menjaga suhu tetap dalam rentang yang sesuai. Setiap hari, data suhu yang tercatat memberikan informasi yang berharga untuk menganalisis kemampuan sensor dalam mengatur suhu air secara otomatis, sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 3. Dengan pemantauan suhu yang efektif, sistem akuaponik diharapkan dapat berfungsi dengan lebih optimal, menjaga kondisi ideal untuk keberhasilan budidaya ikan dan pertanian tanaman di lahan terbatas.

Tabel 3. Hasil Uji Uji Coba Sensor Ds18b20

Waktu Pengukuran	Suhu Air	Tindakan Heater	Kondisi Ikan	Keterangan
Hari -1	28 oC	Off	Sehat	Suhu air berada dalam kisaran optimal tanpa perlu pemanasan tambahan.
Hari -2	25 oC	On	Sehat	Suhu air berada di bawah kisaran ideal, sehingga pemanas diaktifkan
Hari -3	28 oC	Off	Sehat	Suhu air telah disesuaikan kembali ke rentang yang optimal.
Hari -4	30 oC	Off	Sehat	Suhu air tetap stabil dalam rentang optimal tanpa perlu pemanasan.
Hari -5	27 oC	On	Sehat	Suhu air tidak mencapai tingkat optimal, sehingga heater diaktifkan untuk menstabilkannya.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji penerapan teknologi *Internet of Things (IoT)* pada akuaponik modern untuk mendukung pertumbuhan ikan lele (*Oreochromis niloticus*) dan meningkatkan hasil tanaman. Temuan menunjukkan bahwa penerapan IoT memungkinkan pemantauan parameter lingkungan secara *real-time*, seperti suhu, TDS, dan pH air, yang memastikan kondisi tetap optimal. Sensor suhu DS18B20 berperan penting dalam menjaga suhu air stabil pada 28°C dengan mengaktifkan pemanas otomatis saat suhu menurun. Hasil pengujian selama lima hari mengonfirmasi efektivitas sensor ini dalam menciptakan lingkungan ideal untuk pertumbuhan ikan dan tanaman, dengan pH 7,2 dan TDS 300 ppm juga berada dalam rentang optimal. Penerapan *IoT* meningkatkan efisiensi pengelolaan akuaponik, memungkinkan peternak merespons perubahan lingkungan dengan cepat dan akurat. Selain itu, penelitian ini menyarankan pengintegrasian teknologi canggih seperti kecerdasan buatan (AI) untuk lebih mengoptimalkan sistem. Dengan pendekatan ini, akuaponik dapat berkembang menjadi solusi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan untuk sektor pertanian dan perikanan di lahan terbatas.

REFERENSI

- [1] S. P. Sulaiman, M. S. D. T. S. Arzam, S. P. Ar, M. S. D. A. N. Samsi, And M. S. D. A. Ahmad, Okupasi Lahan Untuk Budidaya Dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan Berbasis Teori Analisis Sistem. Cv. Azka Pustaka, 2024.
- [2] N. Saskia, D. Firnia, P. Utama, And A. H. Sodik, "The Efektivitas Rhizobakteria Dan Pupuk Kotoran Kambing Pada Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Bawang Merah (*Allium Ascalonicum* L.)," Jia (Jurnal Ilm. Agribisnis) J. Agribisnis Dan Ilmu Sos. Ekon. Pertan., Vol. 9, No. 3, Pp. 215–226, 2024.
- [3] B. Setiawan, S. Styawati, And S. Alim, "Implementasi Sistem Iot Pada Akuakultur Dan Hydroponik (Akuaponik) Modern Untuk Pertumbuhan Ikan Nila," J. Inform. J. Pengemb. It, Vol. 9, No. 1, Pp. 47–53, 2024.
- [4] M. Handayani, C. Vikasari, And O. Prasadi, "Akuaponik Sebagai Sistem Pemanfaatan Limbah Budidaya Ikan Lele Di Desa Kalijaran," Jtrm (Jurnal Teknol. Dan Rekayasa Manufaktur), Vol. 2, No. 1, Pp. 41–50, 2020.
- [5] G. M. Samadan, A. Syazili, M. N. Findra, S. Supyan, And Y. D. Wijayanti, "Efektifitas Jenis Tanaman Berbeda Terhadap Kualitas Air Media Budidaya Udang Galah (*Macrobrachium Rosenbergii* De Man 1879) Sistem Akuaponik," Juv. J. Ilm. Kelaut. Dan Perikan., Vol. 4, No. 1, Pp. 31–42, 2023.
- [6] N. A. N. Aisyah, A. Sugianti, H. Z. Muhtarom, D. P. Prastyawan, And M. T. Ardiazza, "Implementasi Inovasi (Inovasi Pertanian) Dengan Sistem Aquaponik Sebagai Teknologi Tepat Guna Dalam Budidaya Lele," Nusantara. J. Pengabd. Kpd. Masy., Vol. 3, No. 3, Pp. 161–168, 2023.
- [7] R. A. Nugroho, L. T. Pambudi, D. Chilmawati, And A. H. C. Haditomo, "Aplikasi Teknologi Aquaponik Pada Budidaya Ikan Air Tawar Untuk Optimalisasi Kapasitas Produksi," J. Saintek Perikan., Vol. 8, No. 1, 2012.
- [8] A. A. E. Astari, K. Merta, N. W. A. Sudiartini, And N. P. P. Sukarini, "Studi Kelayakan Usaha Dan Strategi Pengembangan Budidaya Ikan Lele Di Kota Denpasar (Studi Kasus Petani Ikan Lele Di Ubung Kaja)," J. Jdm, Vol. 4, No. 2, Pp. 108–125, 2021.
- [9] A. Alwansyah And A. Fahrurrozi, "Implementasi Internet Of Thing (Iot) Sistem Monitoring Kualitas Air Shrimp Farming Vaname Pada Aplikasi Berbasis Android," J. Ilm. Teknol. Dan Rekayasa, Vol. 29, No. 1, Pp. 71–85, 2024.
- [10] N. Fitriana, A. A. Darmawan, And M. F. Rahmawati, "Internet Of Things Untuk Monitoring Kondisi Air Budidaya Ikan Kelompok 'Tutut Jaya' Kota Malang," J. Abdimas Nusa Mandiri, Vol. 6, No. 2, Pp. 76–85, 2024.
- [11] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, And I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet Of Things (Iot) Di Kampus," Digit. Transform. Technol., Vol. 3, No. 2, Pp. 996–1001, 2023.
- [12] L. Ihtisyamuddin And M. Mashoedah, "Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air Dan Pemberi Pakan Otomatis Pada Kolam Budidaya Ikan Lele Berbasis Internet Of Things Di Mbs (Muhammadiyah Boarding School) Yogyakarta," J. Electron. Educ., 2023.
- [13] P. Puspitahati, R. Andini, And H. P. Rahmad, "Urban Farming Dengan Sistem Hidroponik Nft (Nutrient Film Technique) Dipengaruhi Kemiringan Talang Dan Debit Air Pada Produksi Tanaman

- Pakcoy (*Brassica Rapa Chinensis*),” In Seminar Nasional Lahan Suboptimal, 2021, Pp. 835–843.
- [14] Q. A’yunin Et Al, *Perikanan Berkelanjutan*. Universitas Brawijaya Press, 2021.
- .