

Sistem Akuaponik Cerdas Berbasis IoT untuk Mendukung Ketahanan Pangan Berkelanjutan

Slamet Kurniawan Fahrurrozi^{1*}, Muhammad Hassan Massaty², Dimas Pamilih Epin Andrian²

Program Studi Pendidikan Teknik Informatika dan Komputer, FKIP, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia¹,

Program Studi D3 Teknologi Informasi, Politeknik Nest, Sukoharjo, Indonesia²

*Corresponding author: skfahrurrozi@staff.uns.ac.id

(Diterima: 5 Februari 2026; Disetujui: 10 Juni 2026)

ABSTRACT

Limited agricultural land, increasing food demand and pressure on water resources require the development of efficient and sustainable food production systems. This study aims to evaluate the performance of a smart aquaponic system based on the Internet of Things (IOT) integrated with bio-mechanical filtration using the Nutrient Film Technique (NFT) in maintaining water quality stability and improving productivity. The main problem addressed is how the integration of IOT and biofiltration affects ecosystem balance and the growth performance of fish and plants. An experimental method was applied using three configurations: NFT 1 (100 fish with bio-mechanical filtration), NFT 2 (50 fish with bio-mechanical filtration), and NFT 3 (50 fish with mechanical filtration only). The system utilized sensors for pH, temperature, TDS, and water level, connected to a real-time monitoring platform. The results show that systems with biofiltration maintained stable pH levels between 6.0–6.8 and controlled TDS, while the system without biofiltration exhibited significant fluctuations. The highest growth was observed in NFT 1, with plant height reaching 28.5 cm and fish weight 50.3 g. IOT integration improved system responsiveness and operational efficiency. Therefore, the developed system demonstrates strong potential as an adaptive and efficient solution for sustainable food production to support food security.

Keywords: aquaponics, biofiltration, IOT, NFT, sustainable food security

ABSTRAK

Keterbatasan lahan, peningkatan kebutuhan pangan, dan tekanan terhadap sumber daya air menuntut pengembangan sistem produksi pangan yang efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem akuaponik cerdas berbasis Internet of Things (IOT) yang terintegrasi dengan filtrasi bio-mekanis pada konfigurasi Nutrient Film Technique (NFT) dalam menjaga stabilitas kualitas air dan meningkatkan produktivitas. Permasalahan utama yang dikaji adalah bagaimana pengaruh integrasi IOT dan biofiltrasi terhadap keseimbangan ekosistem serta hasil produksi ikan dan tanaman. Metode yang digunakan adalah eksperimen terkontrol dengan tiga konfigurasi, yaitu NFT 1 (100 ikan dengan bio-mekanis), NFT 2 (50 ikan dengan bio-mekanis), dan NFT 3 (50 ikan dengan filtrasi mekanis). Sistem dilengkapi sensor pH, suhu, TDS, dan ketinggian air yang terhubung ke platform pemantauan real-time. Hasil menunjukkan bahwa sistem dengan biofiltrasi mampu menjaga pH stabil pada kisaran 6,0–6,8 dan TDS dalam batas terkendali, sedangkan sistem tanpa biofiltrasi mengalami fluktuasi signifikan. Pertumbuhan terbaik diperoleh pada NFT 1 dengan tinggi tanaman mencapai 28,5 cm dan berat ikan 50,3 g. Integrasi IOT meningkatkan efisiensi pengelolaan dan respons sistem terhadap perubahan lingkungan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan menunjukkan potensi sebagai solusi produksi pangan berkelanjutan yang adaptif, efisien, dan relevan untuk mendukung ketahanan pangan.

Kata kunci: akuaponik, biofiltrasi, IOT, NFT, ketahanan pangan

Cite this as: Fahrurrozi, S. K., M. H. Massaty., D. P. E. Andrian., (2026). Sistem Akuaponik Cerdas Berbasis IoT untuk Mendukung Ketahanan Pangan Berkelanjutan, *JAHT: Journal of Applied Agriculture, Health, and Technology* 5(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.20961/jaht.v5i1.3513>

PENDAHULUAN

Ketahanan pangan menjadi isu strategis yang semakin kompleks di tingkat global maupun nasional[1]. Pertumbuhan jumlah penduduk yang pesat, konversi lahan pertanian, serta tekanan perubahan iklim telah berkontribusi terhadap menurunnya kapasitas produksi pangan konvensional[2, 3]. Kondisi ini menuntut adanya inovasi dalam sistem produksi pangan yang tidak hanya efisien, tetapi juga berkelanjutan dan adaptif terhadap keterbatasan sumber daya, khususnya di wilayah perkotaan dengan ketersediaan lahan yang terbatas[4, 5].

Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah sistem akuaponik, yaitu integrasi antara akuakultur (budidaya ikan) dan hidroponik (budidaya tanaman tanpa tanah) dalam suatu sistem resirkulasi tertutup[6, 7]. Sistem ini memungkinkan terjadinya siklus nutrisi yang efisien, di mana limbah metabolisme ikan dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman. Dengan demikian, akuaponik tidak hanya mampu menghemat penggunaan air, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia, sehingga lebih ramah lingkungan [4, 8].

Nutrient Film Technique (NFT) termasuk salah satu metode akuaponik yang banyak dikembangkan karena mampu menghemat penggunaan air serta mendukung distribusi nutrisi secara optimal dan merata pada akar tanaman.[9]. NFT beroperasi dengan prinsip aliran tipis larutan nutrisi yang berlangsung secara berkelanjutan, sehingga kebutuhan oksigen dan nutrisi pada akar tanaman dapat terpenuhi secara optimal. [10]. Karakteristik ini menjadikan NFT sangat cocok untuk diterapkan pada lingkungan urban dengan keterbatasan ruang.

Meskipun demikian, sistem akuaponik konvensional masih menghadapi sejumlah kendala, terutama terkait dengan stabilitas kualitas air. Penumpukan limbah organik, seperti amonia dari sisa metabolisme ikan dan pakan yang tidak termakan, dapat menurunkan kualitas lingkungan budidaya [11]. Kondisi tersebut dapat menghambat pertumbuhan ikan dan tanaman apabila tidak dikelola secara optimal. Di samping itu, keterbatasan dalam memantau parameter kualitas air secara real-time sering menyebabkan keterlambatan dalam pengambilan tindakan yang diperlukan. Oleh karena itu, penerapan teknologi Internet of Things (IOT) menjadi salah satu solusi yang semakin efektif dan relevan untuk mengatasi permasalahan tersebut.[6, 12]. Teknologi ini memungkinkan integrasi sensor dan aktuator yang dapat memantau parameter penting seperti pH, suhu, total dissolved solids (TDS), dan ketinggian air secara kontinu[13, 14]. Data yang diperoleh dapat diakses secara real-time melalui platform digital, sehingga sistem dapat dikendalikan secara otomatis dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Selain integrasi IOT, penerapan filtrasi bio-mekanis juga memiliki peran penting dalam menjaga kualitas air[15-17]. Proses biofiltrasi memungkinkan konversi senyawa beracun seperti amonia menjadi nitrat yang lebih aman dan dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Kombinasi antara filtrasi mekanis dan biologis terbukti mampu mengurangi akumulasi limbah organik serta menjaga keseimbangan ekosistem dalam sistem akuaponik [18, 19]. Namun demikian, penelitian yang mengintegrasikan teknologi IOT dengan sistem biofiltrasi dalam konfigurasi NFT masih relatif terbatas, khususnya dalam

konteks implementasi lokal. Sebagian besar studi sebelumnya lebih berfokus pada aspek pemantauan tanpa pengendalian otomatis yang adaptif terhadap dinamika sistem. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih komprehensif mengenai bagaimana integrasi kedua teknologi tersebut dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem akuaponik.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi sistem akuaponik cerdas berbasis *Internet of Things* (IOT) yang terintegrasi dengan filtrasi bio-mekanis pada konfigurasi *Nutrient Film Technique* (NFT). Sistem yang dikembangkan dirancang untuk melakukan pemantauan dan pengendalian kondisi budidaya secara *real-time* melalui integrasi sensor, aktuator, dan platform monitoring digital guna menjaga stabilitas kualitas air, mengoptimalkan pemberian pakan, serta meningkatkan efisiensi pengelolaan ekosistem budidaya ikan dan tanaman secara terpadu. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis pengaruh penerapan sistem terhadap pertumbuhan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*), sekaligus mengukur efektivitas penggunaan sumber daya dalam mendukung produksi pangan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi *smart aquaponics* berbasis IOT yang adaptif, mudah diterapkan di lingkungan urban, serta mendukung penguatan ketahanan pangan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen terkontrol untuk mengkaji kinerja sistem akuaponik cerdas

berbasis *Internet of Things* (IOT) yang terintegrasi dengan filtrasi bio-mekanis pada konfigurasi *Nutrient Film Technique* (NFT) [20]. Fokus penelitian tidak hanya pada aspek teknis sistem, tetapi juga pada potensi penerapannya dalam mendukung produksi pangan berkelanjutan melalui efisiensi pemanfaatan sumber daya dan stabilitas ekosistem. Penelitian dilaksanakan di fasilitas *greenhouse* semi-terkontrol yang berlokasi di Kabupaten Klaten, Jawa Tengah, yang dipilih karena memiliki dukungan infrastruktur memadai seperti jaringan listrik, akses internet, serta kondisi lingkungan yang relatif stabil untuk implementasi sistem berbasis IOT. Kegiatan pengamatan dilakukan selama kurang lebih 30 hari masa budidaya.

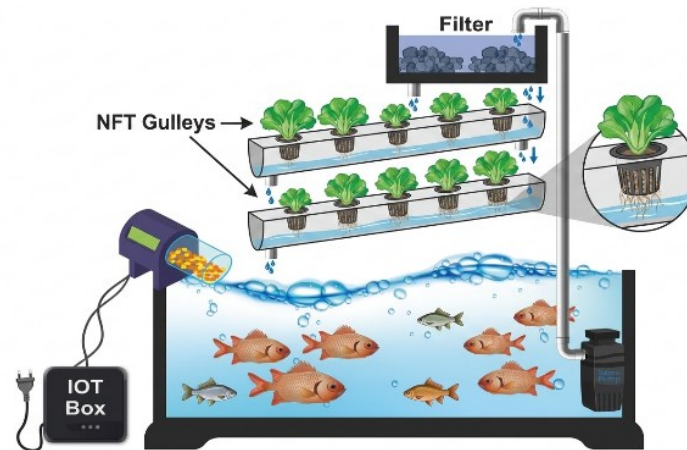
Desain Sistem Akuaponik Berbasis IOT

Sistem akuaponik yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan konfigurasi *Nutrient Film Technique* (NFT) yang dilengkapi dengan perangkat berbasis *Internet of Things* (IOT) untuk mendukung pemantauan dan pengendalian secara otomatis. Sistem dikendalikan oleh mikrokontroler NodeMCU yang terhubung dengan berbagai sensor kualitas air, meliputi pH, suhu, total dissolved solids (TDS), serta ketinggian air. Selain itu, digunakan aktuator berupa pompa air dan aerator untuk menjaga sirkulasi dan suplai oksigen dalam sistem. Untuk meningkatkan kualitas air, sistem dilengkapi dengan unit filtrasi mekanis dan biofiltrasi yang berfungsi menyaring partikel padat serta menguraikan limbah organik melalui proses biologis.

Data hasil pembacaan sensor dikirim secara *real-time* menuju platform ThingSpeak melalui jaringan IOT guna memungkinkan pemantauan sistem secara kontinu. Informasi yang diperoleh

kemudian digunakan sebagai acuan dalam pengendalian operasional otomatis agar parameter lingkungan tetap terjaga pada kondisi yang optimal. Penerapan integrasi teknologi tersebut diharapkan dapat

meningkatkan efisiensi pengelolaan sistem serta menunjang keberlanjutan proses produksi. Rancangan sistem yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem NFT Filtrasi Bio-Mekanis Terintegrasi IOT

Desain Eksperimen dan Teknik Pengumpulan Data

Eksperimen dirancang menggunakan tiga konfigurasi sistem akuaponik yang dioperasikan secara paralel untuk menganalisis pengaruh variasi kepadatan ikan dan jenis filtrasi terhadap kinerja sistem secara menyeluruh. Konfigurasi pertama (NFT 1) menggunakan 100 ekor ikan dengan filtrasi bio-mekanis, konfigurasi kedua (NFT 2) menggunakan 50 ekor ikan dengan filtrasi bio-mekanis, sedangkan konfigurasi ketiga (NFT 3) menggunakan 50 ekor ikan dengan filtrasi mekanis tanpa biofiltrasi. Komoditas yang digunakan dalam penelitian ini adalah ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*) yang dipilih berdasarkan nilai konsumsi yang tinggi serta siklus produksi yang relatif singkat, sehingga relevan untuk sistem produksi pangan berkelanjutan.

Pengumpulan data dilakukan secara terintegrasi melalui sistem IOT dan observasi langsung untuk memperoleh data yang komprehensif. Parameter kualitas air, meliputi pH, suhu, *total dissolved solids* (TDS), dan ketinggian air, direkam secara otomatis dan berkala menggunakan sensor yang terhubung ke sistem. Selain itu, dilakukan pengamatan manual terhadap pertumbuhan ikan berdasarkan bobot awal dan akhir, pertumbuhan tanaman berdasarkan tinggi dan berat segar, serta kondisi visual air dan kesehatan organisme. Kombinasi pendekatan ini memungkinkan evaluasi performa sistem secara lebih akurat, baik dari aspek teknis maupun biologis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem akuaponik berbasis IOT dengan integrasi filtrasi bio-mekanis dalam konfigurasi NFT, khususnya dalam menjaga stabilitas

kualitas air serta mendukung produktivitas ikan dan tanaman. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kombinasi teknologi IOT dan biofiltrasi memberikan pengaruh signifikan terhadap keseimbangan ekosistem serta efisiensi sistem secara keseluruhan. Untuk menganalisis kinerja tersebut secara komprehensif, digunakan tiga konfigurasi sistem yang berbeda, yaitu NFT 1 dengan 100 ekor ikan dan filtrasi bio-mekanis yang menggabungkan filter mekanis dan biofilter, NFT 2 dengan 50 ekor ikan dan filtrasi bio-mekanis, serta NFT 3 dengan 50 ekor ikan yang hanya menggunakan filtrasi mekanis tanpa biofiltrasi. Perbedaan konfigurasi ini dirancang untuk mengkaji pengaruh variasi kepadatan ikan dan jenis filtrasi terhadap stabilitas kualitas air serta produktivitas sistem akuaponik secara menyeluruh.

Stabilitas Kualitas Air

Parameter kualitas air menjadi indikator utama dalam menilai keberhasilan sistem akuaponik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem dengan filtrasi bio-mekanis (NFT 1 dan NFT 2) mampu mempertahankan nilai pH dalam kisaran relatif stabil, yaitu antara 6,0–6,8 selama periode pengamatan. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa proses nitrifikasi berlangsung secara efektif, di mana amonia hasil metabolisme ikan diubah menjadi

nitrat yang lebih aman dan dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Hasil pengukuran pH dari tiga konfigurasi sistem NFT ditampilkan pada Tabel 1. Sebaliknya, pada sistem tanpa biofiltrasi (NFT 3), terjadi penurunan pH yang lebih tajam hingga mencapai kondisi asam. Hal ini disebabkan oleh akumulasi limbah organik yang tidak terurai secara biologis sehingga memicu proses dekomposisi anaerob dan menghasilkan senyawa asam. Fenomena ini menunjukkan bahwa keberadaan biofiltrasi berperan penting dalam menjaga keseimbangan kimia air dan mencegah fluktuasi ekstrem yang dapat mengganggu organisme budidaya.

Selain pH, parameter total dissolved solids (TDS) juga menunjukkan pola yang berbeda antar konfigurasi. NFT 1 dan NFT 2 memperlihatkan peningkatan TDS yang relatif terkendali, mencerminkan keseimbangan antara produksi limbah dan proses pemanfaatan nutrisi oleh tanaman. Sebaliknya, NFT 3 mengalami peningkatan TDS yang signifikan hingga mencapai tingkat yang berpotensi mengganggu kualitas air. Kondisi ini menegaskan bahwa integrasi biofiltrasi dan pengendalian berbasis IOT mampu menjaga stabilitas lingkungan budidaya secara lebih efektif dibandingkan sistem konvensional.

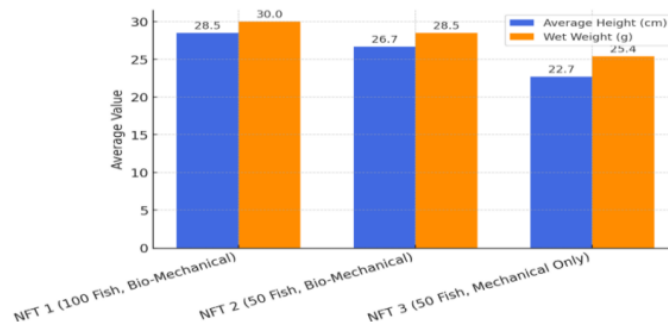
Tabel 1. Nilai pH sistem NFT dalam tiga konfigurasi selama 30 hari

Hari	NFT 1 (100 Ikan + Bio-Mekanis)	NFT 2 (50 Ikan + Bio-Mekanis)	NFT 3 (50 Ikan + Mekanis saja)
1	6,8	6,9	7,0
5	6,7	6,8	6,4
10	6,5	6,7	6,1
15	6,3	6,5	5,9
20	6,2	6,4	5,7
25	6,1	6,3	5,5
30	6,0	6,2	5,4

Kinerja Pertumbuhan Tanaman dan Ikan

Dari sisi produktivitas, sistem NFT 1 menunjukkan performa terbaik dalam mendukung pertumbuhan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*), dengan rata-rata tinggi mencapai 28,5 cm dan berat segar sebesar 30,0 g per tanaman. Tingginya pertumbuhan ini dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi yang lebih melimpah akibat kepadatan ikan yang lebih tinggi, serta didukung oleh kualitas air yang tetap stabil berkat biofiltrasi. NFT 2 juga

menunjukkan hasil yang baik, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan NFT 1, yang mengindikasikan bahwa sistem dengan kepadatan sedang masih mampu menjaga keseimbangan antara suplai nutrisi dan efisiensi sistem. Sebaliknya, NFT 3 menghasilkan pertumbuhan tanaman terendah akibat kualitas air yang kurang stabil, sehingga menghambat proses penyerapan nutrisi oleh akar tanaman. Hasil pengukuran pertumbuhan *Ipomoea aquatica* disajikan pada Gambar 2.

Gambar 2. Hasil pengukuran pertumbuhan *Ipomoea aquatica*

Pada pertumbuhan ikan nila (*Oreochromis niloticus*), pola yang serupa juga terlihat. Sistem NFT 1 menghasilkan penambahan biomassa tertinggi dengan rata-rata berat akhir mencapai 50,3 g per ekor, sedangkan NFT 2 menunjukkan performa yang relatif stabil dengan efisiensi pakan yang lebih baik. Sebaliknya, NFT 3 mencatat pertumbuhan terendah, yang

mengindikasikan bahwa kualitas lingkungan yang tidak terkontrol berdampak langsung terhadap kesehatan dan pertumbuhan ikan. Pengukuran pertumbuhan disajikan pada Tabel 2 Kinerja pertumbuhan *Oreochromis niloticus*. Temuan ini menegaskan bahwa stabilitas kualitas air yang didukung oleh biofiltrasi dan sistem IOT memiliki peran

penting dalam meningkatkan produktivitas akuaponik secara keseluruhan.

Tabel 2. Kinerja pertumbuhan *Oreochromis niloticus*

Sistem Akuaponik	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Total Pertambahan Berat (kg)
NFT 1 (100 ikan, Bio Mekanis)	27,5	50,3	2,3
NFT 2 (50 ikan, Bio-Mekanis)	27,2	48,1	1,0
NFT 3 (50 ikan, Mekanis saja)	27,4	42,7	0,8

Peran IOT dalam Optimalisasi Sistem

Integrasi teknologi IOT dalam sistem ini memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keandalan pengelolaan akuaponik. Pemantauan parameter kualitas air secara real-time memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan kondisi lingkungan, sehingga sistem dapat merespons secara cepat melalui pengendalian otomatis. Hal ini berbeda dengan sistem konvensional yang masih bergantung pada pemantauan manual dan cenderung kurang responsif terhadap fluktuasi parameter.

Selain itu, penggunaan platform digital seperti ThingSpeak memungkinkan pencatatan data secara kontinu yang dapat dianalisis untuk mengidentifikasi pola dan tren. Dengan demikian, sistem tidak hanya bersifat reaktif tetapi juga adaptif, sehingga mampu mempertahankan kondisi optimal dalam jangka waktu yang lebih panjang. Temuan ini memperkuat hasil penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa penerapan IOT dalam akuaponik dapat meningkatkan efisiensi operasional dan stabilitas sistem secara signifikan.

Implikasi terhadap Ketahanan Pangan Berkelanjutan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem akuaponik berbasis IOT memiliki potensi besar dalam mendukung ketahanan pangan berkelanjutan, khususnya

di lingkungan dengan keterbatasan lahan dan sumber daya. Stabilitas kualitas air yang terjaga, produktivitas biomassa yang tinggi, serta efisiensi pemanfaatan nutrisi menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan pangan secara berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang minimal. Integrasi antara ikan dan tanaman dalam satu sistem resirkulasi menciptakan siklus nutrisi yang efisien, sehingga mengurangi kebutuhan input eksternal seperti pupuk dan air. Selain itu, otomatisasi berbasis IOT memungkinkan pengelolaan sistem yang lebih mudah dan minim intervensi, sehingga berpotensi diterapkan pada skala rumah tangga maupun komunitas urban farming.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi teknologi IOT dan biofiltrasi dalam sistem NFT tidak hanya meningkatkan kinerja teknis akuaponik, tetapi juga memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan model produksi pangan yang berkelanjutan, adaptif, dan relevan dengan tantangan ketahanan pangan di masa depan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi *Internet of Things* (IOT) dengan sistem filtrasi bio-mekanis pada akuaponik berbasis *Nutrient Film Technique* (NFT) mampu meningkatkan stabilitas kualitas air serta produktivitas

ikan dan tanaman secara signifikan. Sistem dengan biofiltrasi (NFT 1 dan NFT 2) terbukti lebih mampu menjaga parameter penting seperti pH dan TDS tetap dalam rentang optimal dibandingkan sistem tanpa biofiltrasi, sehingga menciptakan lingkungan budidaya yang lebih stabil dan mendukung pertumbuhan organisme secara maksimal.

Dari aspek produktivitas, konfigurasi NFT 1 menghasilkan pertumbuhan biomassa tertinggi baik pada tanaman *Ipomoea aquatica* maupun ikan *Oreochromis niloticus*, sementara NFT 2 menunjukkan efisiensi yang lebih seimbang antara pertumbuhan dan penggunaan sumber daya. Sebaliknya, sistem tanpa biofiltrasi (NFT 3) menunjukkan keterbatasan dalam menjaga kualitas lingkungan, yang berdampak pada penurunan kinerja pertumbuhan.

Implementasi IOT dalam sistem ini memberikan nilai tambah melalui kemampuan pemantauan dan pengendalian secara real-time, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan meminimalkan intervensi manual. Lebih jauh, kombinasi antara otomatisasi, efisiensi pemanfaatan nutrisi, serta integrasi produksi ikan dan tanaman dalam satu sistem resirkulasi menunjukkan potensi kuat sebagai model produksi pangan berkelanjutan.

Dengan demikian, sistem akuaponik cerdas berbasis IOT yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga relevan sebagai solusi inovatif dalam mendukung ketahanan pangan, khususnya pada skala rumah tangga dan urban farming yang menghadapi keterbatasan lahan dan sumber daya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ibnu, "Reposisi BULOG dan Integrasi Empat Dimensi FAO: Model Konseptual dan Roadmap Strategis Ketahanan Pangan Nasional Indonesia (Repositioning BULOG and Integrating the Four FAO Dimensions: A Conceptual Model and Strategic Roadmap for Indonesia's National Food Security)," *JURNAL PANGAN*, vol. 34, no. 2, pp. 169-188, 2025.
- [2] W. Sanjesti and A. Silviana, "Dampak alih fungsi lahan pertanian menjadi lahan kering," *Legal Standing: Jurnal Ilmu Hukum*, vol. 9, no. 2, pp. 420-435, 2025.
- [3] D. R. Hakim, A. Rahmiwati, and R. Flora, "Menjelajahi Dinamika Pangan di Era Perubahan Iklim Terhadap Dampak di Indonesia dan Proyeksi Masa Depan: A Systematic Review," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 7, no. 3, pp. 1703-1720, 2025.
- [4] G. Marni Putri, Z. Restu Jaya, T. Septian Oktani, and N. Ayler Beniah, "Pertanian Perkotaan, Solusi Inovatif untuk Ketahanan Pangan di Tengah Kota," *Flora : Jurnal Kajian Ilmu Pertanian dan Perkebunan*, vol. 2, no. 1, pp. 188-198, 02/03 2025.
- [5] T. Setiawan and M. F. A. Pratama, "Pemenuhan pangan berkelanjutan melalui pemanfaatan lahan pekarangan sebagai adaptasi baru urban farming di Kota Bandung," *Jurnal Pengabdian Sosial*, vol. 1, no. 9, pp. 973-983, 2024.
- [6] A. Syaputra and N. S. Prawira, "Implementasi Teknologi IOT dalam Sistem Akuaponik dan Akuakultur

- Modern untuk Optimasi Pertumbuhan Ikan Lele," *ILKOMNIKA*, vol. 6, no. 3, pp. 383-392, 2024.
- [7] J. C. Kusuma, D. Iskandar, and F. R. Putri, "Sistem Akuakultur Dan Hidroponik (Akuaponik) Untuk Pertumbuhan Ikan Konsumsi Air Tawar Berbasis Iot," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 6, pp. 9804-9810, 2025.
- [8] D. Trisnawati, Z. Rozaki, R. Wulandari, and C. W. Amanah, "Eksistensi Generasi muda dalam membangun pertanian modern dengan memanfaatkan sistem hidroponik dan aquaponik," in *Seminar Nasional Agribisnis*, 2024, vol. 1, no. 2, pp. 83-89.
- [9] H. N. Shobihah, A. Yustiati, and Y. Andriani, "Produktivitas Budidaya ikan dalam berbagai konstruksi sistem akuaponik," *Akuatika Indonesia*, vol. 7, no. 1, pp. 34-41, 2022.
- [10] G. Y. Nurhaliza, S. P. Wirman, and N. Fitrya, "Rancang Bangun Sistem Otomasi Pengatur Nutrisi pada Tanaman Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT) dengan Sistem Pembangkit Listrik Off Grid Photovoltalk," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 8, no. 1, pp. 545-554, 2025.
- [11] M. Rusli, "Dinamika amonia, nitrit, dan nitrat pada budidaya ikan nila (*Oreochromis niloticus*) sistem resirkulasi," in *Seminar Nasional Pariwisata dan Kewirausahaan (SNPK)*, 2025, vol. 4, pp. 1129-1139.
- [12] B. A. Sukmawan, M. R. Faiz, S. W. Susilo, and N. A. S. Rahmadhani, "Implementasi smart akuaponik dengan IOT untuk pertanian perkotaan yang efisien," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025.
- [13] Y. S. PANDIANGAN, S. ZULAIKHA, W. WARTO, and S. YUDO, "Status Kualitas Air Sungai Ciliwung Berbasis Pemantauan Online di Wilayah DKI Jakarta Ditinjau dari Parameter Suhu, pH, TDS, DO, DHL, dan Kekeruhan: Status of Ciliwung River Water Quality Based on Online Monitoring in DKI Jakarta Area in Terms of Temperature, pH, TDS, DO, DHL, and Turbidity Parameters," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 24, no. 2, pp. 176-182, 2023.
- [14] E. M. P. E. Santoso, A. I. Pradana, and J. Maulindar, "Optimalisasi Teknologi IOT untuk Penyemprotan Tanaman Padi," *Innovative: Journal Of Social Science Research*, vol. 5, no. 3, pp. 5372-5389, 2025.
- [15] H. Abdilmouti, 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.
- [16] J. de Oliveira Demarco, S. L. Hutchinson, L. M. Bastos, G. Hettiarachchi, M. Almutari, and E. Nottingham, "Industrial wastewater treatment by plant-based bio-filtration," *International Journal of Phytoremediation*, vol. 25, no. 14, pp. 1945-1955, 2023.
- [17] F. M. Yusoff, W. A. Umi, N. M. Ramli, and R. Harun, "Water quality management in aquaculture," *Cambridge Prisms: Water*, vol. 2, p. e8, 2024.

- [18] L. Jin, X. Sun, H. Ren, and H. Huang, "Biological filtration for wastewater treatment in the 21st century: A data-driven analysis of hotspots, challenges and prospects," *Science of the Total Environment*, vol. 855, p. 158951, 2023.
- [19] Y. Men, Z. Li, L. Zhu, X. Wang, S. Cheng, and Y. Lyu, "New insights into membrane fouling during direct membrane filtration of municipal wastewater and fouling control with mechanical strategies," *Science of the Total Environment*, vol. 869, p. 161775, 2023.
- [20] M. Waruwu, S. N. Pu`at, P. R. Utami, E. Yanti, and M. Rusydiana, "Metode Penelitian Kuantitatif: Konsep, Jenis, Tahapan dan Kelebihan," *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan*, vol. 10, no. 1, pp. 917-932, 02/28 2025.