

Sistem Otomatisasi Pengairan Tanaman Hidroponik Berbasis NodeMCU ESP 8266

*¹Ferdiansyah Aditya Soliata dan ²Ryan Randy Suryono

¹Teknik Komputer, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Teknokrat Indonesia, Lampung, Indonesia

²Sistem Informasi, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Teknokrat Indonesia, Lampung, Indonesia

e-mail: *¹ferdiansyah_aditya_soliata@teknokrat.ac.id, ²ryan@teknokrat.ac.id

Abstract — *Land conversion has a significant impact on the limited land area and water availability, particularly affecting agriculture. Water demand and quality are crucial for the growth and productivity of crops. One effective method for watering plants is aquaponics. In hydroponic systems, the timing of water distribution greatly influences the quality and quantity of fish and plants produced. The maximum turbidity level for hydroponics should not exceed 25 NTU. The purpose of developing this automated irrigation system is to assist aquaponic farmers and reduce losses. This research employs the prototype method, utilizing a turbidity sensor and an ultrasonic sensor, along with a water pump to regulate water flow to aquaponic plants. The system operates by sending sensor measurements to the NodeMCU ESP 8266 module, which then determines whether the water pump should be activated based on the sensor readings. This tool is designed to relieve farmers from the burden of manually monitoring their aquaponic systems, as it will automatically adjust water levels according to sensor data.*

Keywords: *Aquaponics; NodeMCU ESP 8266; Turbidity; Ultrasonic.*

1. PENDAHULUAN

Dengan pertumbuhan populasi manusia, lahan untuk budidaya ikan dan berkebun semakin terbatas, sementara permintaan pangan meningkat secara signifikan, terutama di sektor pertanian [1]. Untuk mengatasi masalah ketahanan pangan nasional yang disebabkan oleh meningkatnya konversi lahan pertanian, perlu dikembangkan dan diterapkan inovasi teknologi pertanian, salah satunya adalah teknik budidaya hidroponik. Hidroponik merupakan metode yang menggabungkan budidaya ikan dan tanaman dalam satu sistem. Teknik ini menggabungkan prinsip hidroponik, yang berasal dari kombinasi teknik pertanian tangki dan terapi jarum [2]. Hidroponik meningkatkan efisiensi energi dan ekonomi dengan mengkoordinasikan budidaya ikan dan tanaman [3][4], di mana nutrisi dari limbah ikan digunakan oleh tanaman. Strategi ini tidak hanya mengoptimalkan penggunaan lahan tetapi juga memanfaatkan limbah ikan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman, menciptakan sistem yang berkelanjutan dan efisien [5][6].

Namun, jika limbah ikan dibiarkan terlalu lama, hal ini dapat menjadi racun bagi ikan. Hidroponik adalah salah satu konsep pertanian yang menjanjikan karena meniru siklus alami dan dapat mengurangi kontaminasi lingkungan serta menghemat penggunaan air [7][8]. Teknik ini tidak hanya menghemat lahan dan air tetapi juga meningkatkan efisiensi usaha dengan memanfaatkan sisa pakan dan metabolisme ikan untuk tanaman air, menjadikannya salah satu sistem budidaya ikan yang ramah lingkungan [9]. Dengan prosedur ini, terjadi interaksi mutualisme yang menguntungkan atau siklus alami yang bermanfaat [10]. Meskipun demikian, metode ini juga menghadapi beberapa tantangan [11].

Masalah dalam memanfaatkan strategi hidroponik adalah bahwa waktu distribusi air sangat mempengaruhi kualitas dan jumlah ikan serta tanaman yang dihasilkan. Tingkat kekeruhan maksimum untuk hidroponik tidak boleh melebihi 25 NTU [12]. Kesejahteraan ikan juga berdampak pada sistem hidroponik [13]. Jika kekeruhan air mencapai atau melebihi 25 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*), daun tanaman bisa menguning. NTU adalah satuan untuk mengukur tingkat kekeruhan air. Selain itu, jika air dalam sistem hidroponik berlebihan dan menyebabkan pot tanaman terlalu terendam, daun tanaman juga bisa berubah warna menjadi kuning.

Oleh karena itu, para ilmuwan menggunakan metode model yang memanfaatkan beberapa perangkat, khususnya NodeMCU sebagai *microcontroller*, sensor turbiditas untuk mengukur kekeruhan air, dan sensor ultrasonik untuk mengatur ketinggian air saat pengisian dan pengurasan. Sistem ini menggunakan dua pompa

DC yang diaktifkan untuk menguras dan mengisi air. Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan sistem pengairan pada hidroponik yang dapat mendeteksi nilai kekeruhan air di kolam ikan, menghidupkan dan mematikan pompa air berdasarkan kualitas air yang terdeteksi oleh sensor kekeruhan dan sensor ultrasonik, serta memastikan alat ini berfungsi dengan baik sesuai dengan harapan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu metode *Prototype*. Metode *Prototype* mengembangkan replikasi dari produk asli yang diperkecil sehingga dalam pengerjaannya tidak membutuhkan banyak biaya dan bahan yang berlebih.

2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahapan dalam penelitian ini yang dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai teknologi yang dibutuhkan serta mengidentifikasi masalah pada penelitian ini. Pengumpulan data melalui tiga cara, yakni studi literatur, wawancara, dan observasi.

2.2. Kebutuhan Penelitian

Kebutuhan penelitian meliputi komponen perangkat keras maupun perangkat lunak yang diperlukan dalam mengembangkan sistem. Tabel 1 berikut adalah komponen-komponen yang dibutuhkan dalam melakukan perancangan *prototype*.

Tabel 1. Komponen Perangkat Keras.

No	Nama Komponen	Kegunaan
1	NodeMCU	Alat ini berfungsi sebagai pusat pengendali yang akan mengontrol keseluruhan sistem ini agar saling keterkaitan satu dengan yang lainnya.
2	Sensor <i>Turbidity</i>	Sensor ini digunakan untuk mengetahui nilai kekeruhan yang berada di dalam air.
3	Sensor <i>Ultrasonic</i>	Sensor ini digunakan sebagai inputan untuk mengetahui ketinggian dan kerendahan debit air.
4	<i>Relay</i>	<i>Relay</i> digunakan sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik terhadap pompa.
5	Pompa DC	Pompa DC digunakan sebagai pengalir air dan penguras air apabila nilai dari inputan sensor mencapai kondisi yang telah ditentukan.
6	Kabel <i>Jumper</i>	Kabel <i>jumper</i> digunakan sebagai penghubung antar komponen sehingga komponen dapat berkomunikasi satu dengan yang lain.
7	<i>Adaptor Power</i>	<i>Adaptor power</i> digunakan sebagai pemberi daya listrik terhadap <i>microcontroller</i> yang digunakan.

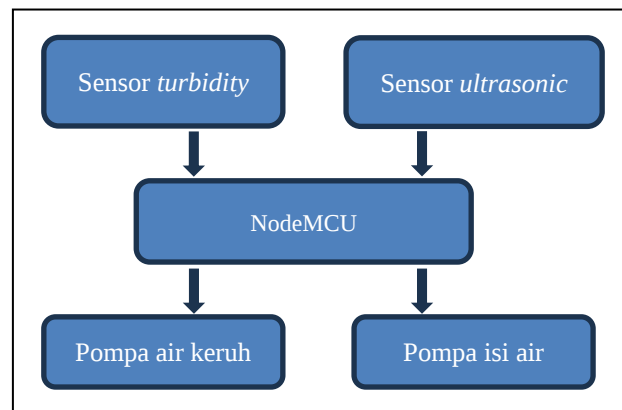
Tabel 2. Komponen Perangkat Lunak.

No	Nama Perangkat Lunak	Kegunaan
1	Arduino IDE	Arduino IDE digunakan sebagai tempat untuk membuat program dan menginputkan ke dalam NodeMCU sebagai perintah.
2	Fritzing	Fritzing digunakan untuk membuat desain skematik alat yang dikembangkan.
3	CorelDraw	CorelDraw digunakan untuk membuat desain <i>prototype</i> sistem yang dikembangkan.

Tabel 2 menjelaskan tentang komponen perangkat lunak serta kegunaanya dalam penelitian yang dilakukan. Fungsi perangkat lunak sendiri sangat berpengaruh dalam penelitian ini karna perangkat keras sangat berperan dalam proses mendesain serta proses pemrograman perangkat keras.

2.3. Diagram Blok

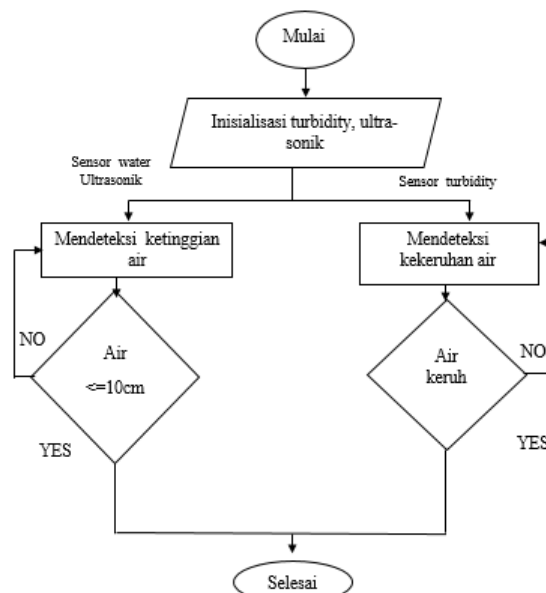
Perancangan diagram blok adalah proses menggambarkan struktur suatu sistem atau proses dengan menggunakan blok-blok sebagai representasi visual dari komponen-komponen utama sistem tersebut. Pada umumnya, diagram blok menggunakan bentuk-bentuk geometris, seperti persegi panjang atau oval, untuk merepresentasikan blok-blok tersebut. Garis-garis penghubung antar blok menggambarkan hubungan dan aliran informasi antar komponen-komponen tersebut. Perancangan diagram blok merupakan langkah awal dalam proses pengembangan sistem dan membantu dalam memberikan pandangan yang jelas terhadap struktur keseluruhan sistem. Diagram blok pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok.

2.4. Flowchart

Flowchart adalah representasi grafis dari alur kerja atau proses sistematis yang digambarkan menggunakan simbol-simbol standar dan panah-panah untuk menggambarkan langkah-langkah secara berurutan. *Flowchart* digunakan untuk menyajikan secara visual urutan langkah-langkah dalam suatu prosedur atau proses, baik itu dalam konteks pemrograman, bisnis, manufaktur, atau bidang lainnya. Gambar 2 mengilustrasikan alur kerja pengembangan *prototype* pada penelitian ini yang disusun dengan *flowchart*.

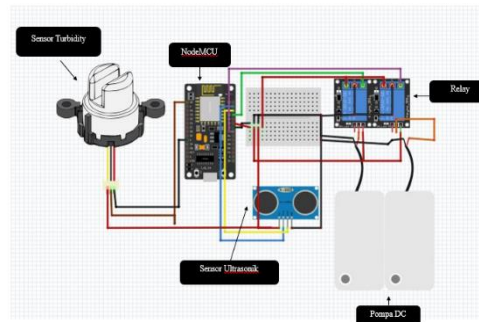


Gambar 2. Bagan Flowchart.

Gambar 2 menunjukkan alur dari *prototype* yang dikembangkan, yaitu sensor turbidity akan mendeteksi air apabila nilainya keruh maka pompa satu akan hidup kemudian air akan dikuras sampai nilai air tidak lagi keruh. Sensor *ultrasonic* digunakan untuk mendeteksi ketinggian air dimana ketika air yang dikuras mencapai ketinggian ≤ 10 cm maka pompa 2 akan mengisi air secara otomatis dan akan berhenti ketika ketinggian atau air sudah dinyatakan sesuai dengan kondisi yang ditentukan.

2.5. Skematik Alat

Skematik alat adalah representasi visual dari struktur dan hubungan antar komponen dalam suatu perangkat atau sistem. Skema ini menggunakan simbol-simbol grafis untuk mewakili berbagai elemen seperti resistor, kapasitor, transistor, dan lainnya, serta menggambarkan bagaimana komponen-komponen tersebut terhubung satu sama lain. Gambar 3 adalah contoh rangkaian skematik dari keseluruhan alat yang digunakan.



Gambar 3. Skemtaik Alat.

Berikut merupakan penjelasan dari Gambar 3:

1. NodeMCU pada alat ini berfungsi sebagai pusat pengendali yang akan mengontrol keseluruhan sistem agar saling keterkaitan satu dengan yang lainnya.
2. Sensor *Turbidity* digunakan untuk mengetahui nilai kekeruhan yang berada di dalam air.
3. Sensor *Ultrasonic* digunakan sebagai inputan untuk mengetahui ketinggian dan kerendahan debit air.
4. *Relay* digunakan sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik terhadap pompa.
5. Pompa DC digunakan sebagai pengalir air dan penguras air apabila nilai dari inputan sensor mencapai kondisi yang telah ditentukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan teknologi pengairan otomatis pada tanaman hidroponik dengan menggunakan sensor *ultrasonic* dan sensor *turbidity*. Adapun hasil perancangannya diuji untuk mengetahui kalibrasi dari karakteristik setiap sensor.

3.1. Implementasi

Gambar 4 merupakan kerangka atau bentuk fisik dari alat yang digunakan dalam penelitian ini. Pada alat tersebut terdapat sensor *turbidity*, sensor *ultrasonic*, *relay*, pompa DC, dan komponen perangkat keras lainnya yang saling terhubung dan bekerja.



Gambar 4. Implementasi Alat.

3.2. Pemrograman

Aplikasi yang digunakan untuk memprogram adalah Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino IDE adalah lingkungan pengembangan perangkat lunak yang digunakan untuk membuat dan memprogram *microcontroller*. Arduino sendiri adalah *platform open-source* yang dirancang untuk memudahkan pengembangan prototipe perangkat keras (*hardware*) yang dapat diatur ulang (*reprogrammable*) oleh penggunaanya.



Gambar 5. Program Sensor *Ultrasonic* dan *Turbidity*.

Gambar 5 menjelaskan tentang pembuatan suatu kondisi yang ditanam kepada *microcontroller*. Kondisi tersebut ialah perintah untuk menentukan suatu kondisi dari masing-masing sensor untuk melakukan identifikasi objek. Ketika kondisi dari kedua sensor tersebut terpenuhi maka *microcontroller* akan mengeksekusi perintah selanjutnya seperti menghidupkan atau mematikan pompa DC.

3.3. Hasil Pengujian Sensor *Ultrasonic*

Pengujian dilakukan guna mendapatkan hasil yang presisi dan akurat. Sensor *ultrasonic* sendiri digunakan untuk mengukur tinggi rendahnya debit air di dalam wadah penampungan. Uji coba yang dilakukan menggunakan sensor *ultrasonic* dan alat ukur penggaris untuk mengukur kesamaan tinggi dari air.

Tabel 3. Uji Coba Ketinggian Sensor *Ultrasonic*.

No	Pengukuran Sensor <i>Ultrasonic</i>	Pengukuran menggunakan Penggaris	Hasil
1	5 cm	5 cm	Sesuai
2	9 cm	9 cm	Sesuai
3	12 cm	12 cm	Sesuai
4	15 cm	15 cm	Sesuai
5	8 cm	8 cm	Sesuai
6	17 cm	17 cm	Sesuai
7	18 cm	18 cm	Sesuai
8	19 cm	19 cm	Sesuai
9	7 cm	7 cm	Sesuai
10	10 cm	10 cm	Sesuai

Pada Tabel 3 didapatkan hasil yang sesuai dari setiap percobaan yang dilakukan. Percobaan dilakukan di dalam ruangan yang terhindar dari angin yang dapat menggerakkan air di dalam wadah.

3.4. Pengujian Sensor *Ultrasonic* dan Pompa DC

Tabel 4. Uji Coba Sensor *Ultrasonic* dan Pompa DC.

No	Nilai Sensor <i>Ultrasonic</i>	Kondisi yang Dibuat	Hasil
1	6 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati
2	8 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati
3	15 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Hidup
4	13 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Hidup
5	3 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati
6	5 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati
7	9 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati
8	12 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Hidup
9	15 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Hidup
10	8 cm	≤ 10 maka pompa hidup ≥ 10 maka pompa mati	Pompa Mati

Pada Tabel dapat dilihat hasil pengujian untuk sensor *ultrasonic* dengan 5 kali percobaan. Batasan nilai untuk ketinggian air adalah 10, dengan kondisi jika nilai di atas dari 10 maka pompa akan hidup untuk menambah air pada tanaman hidroponik, sebaliknya jika nilai di bawah dari 10 maka pompa akan mati. Hasil dari pengujian sensor *ultrasonic* adalah berhasil. Dari 5 kali percobaan hasil yang didapatkan sesuai, sehingga dapat disimpulkan sensor *ultrasonic* ini dapat berjalan dengan baik sebagaimana mestinya.

3.5. Pengujian Sensor *Turbidity* dan Pompa DC

Pada Tabel 5 ditunjukkan hasil pengujian pada sensor *turbidity* sebanyak 10 kali. Batasan nilai untuk ketinggian air adalah 55.00, dengan ketentuan jika nilai di atas dari 55,00 maka pompa akan hidup untuk menambah air pada tanaman hidroponik, sebaliknya jika nilai yang di bawah dari 55.00 maka pompa akan mati. Hasil dari pengujian sensor *turbidity* adalah berhasil. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5 dapat disimpulkan bahwa sensor *turbidity* berjalan dengan baik.

Tabel 5. Pengujian Sensor *Turbidity* dan Pompa DC.

No	Nilai Sensor <i>Turbidity</i>	Hasil
1	47,00	Pompa Mati
2	79,00	Pompa Hidup
3	66,00	Pompa Hidup
4	22,00	Pompa Mati
5	48,00	Pompa Mati
6	37,00	Pompa Mati
7	62,00	Pompa Hidup
8	74,00	Pompa Hidup
9	24,00	Pompa Mati
10	29,00	Pompa Mati

3.6. Pengujian Relay

Pengujian relay bertujuan agar diketahui apakah *relay* dapat bekerja dengan baik dalam menghidupkan atau mematikan pompa pengisian dan pengurusan air. Hasil pengujian *relay* dapat dilihat pada Tabel 6. Berdasarkan table tersebut dapat disimpulkan bahwa selama pengujian *relay* bekerja dengan baik.

Tabel 6. Pengujian *Relay*.

No	Kondisi Relay	Status Pompa	Hasil
1	High	On	Pompa Hidup
2	High	On	Pompa Hidup
3	Low	Off	Pompa Mati
4	Low	Off	Pompa Mati
5	High	On	Pompa Hidup
6	High	On	Pompa Hidup
7	Low	Off	Pompa Mati
8	High	On	Pompa Hidup
9	Low	Off	Pompa Mati
10	Low	Off	Pompa Mati

Salah satu pencapaian utama dari penelitian ini adalah implementasi teknologi otomatisasi yang efisien dalam pertanian akuaponik. Dengan menggunakan sensor kekeruhan dan sensor tingkat air yang terhubung ke NodeMCU, sistem ini dapat secara akurat mengukur kondisi lingkungan tanaman dan secara otomatis mengatur pengisian dan pengurusan air sesuai kebutuhan. Hal ini mengurangi intervensi manusia yang diperlukan untuk pemantauan dan pengaturan air secara manual, sehingga meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian hidroponik.

Selain itu, eksperimen ini memberikan wawasan tentang manfaat penggunaan teknologi IoT dalam pertanian modern. Dengan memanfaatkan NodeMCU, data sensor dapat diperoleh dengan otomatis. Dengan demikian proses ini memberikan petani kemampuan untuk mengontrol sistem secara fleksibel dan responsif, bahkan ketika mereka tidak berada di lokasi, serta memungkinkan pemantauan yang lebih baik terhadap kondisi tanaman secara keseluruhan. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan sistem otomatisasi pengairan tanaman akuaponik menggunakan NodeMCU sebagai *platform* kontrol. Eksperimen ini berhasil menunjukkan kemampuan sistem dalam memantau dan mengatur tingkat air pada sistem hidroponik secara otomatis.

4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan berbagai pengujian dan analisis pada alat atau sistem, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, dapat disimpulkan beberapa hal. Pertama, parameter kualitas air dapat dideteksi menggunakan sensor *turbidity* yang bekerja berdasarkan prinsip bahwa kehadiran partikel padat atau zat terlarut dalam cairan akan mempengaruhi kemampuan cahaya untuk melewati cairan tersebut. Sensor ini akan membaca nilai kekeruhan air dan menampilkannya di serial monitor. Kedua, prinsip kerja sensor *ultrasonic* adalah dengan mengukur jarak melalui gelombang yang dipancarkan dan bertemu dengan air. Ketika gelombang ini mengenai objek, sebagian dari energinya akan dipantulkan kembali ke sensor, dan hasil dari gelombang yang dipancarkan akan diubah menjadi data jarak yang dapat dibaca oleh pengguna dan sistem. Jika nilai data jarak ini kurang dari data jarak yang sudah diinput ke sensor, sensor akan menghidupkan mesin untuk menambah air pada kolam hingga mencapai nilai jarak yang sesuai.

Hasil implementasi pengujian menunjukkan bahwa alat ini dapat berfungsi dengan baik. Dari lima kali percobaan, sistem berhasil melakukan pengurusan dan penambahan air secara otomatis melalui pompa air berdasarkan nilai *output* dari sensor *turbidity* dan sensor *ultrasonic*. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem yang tidak tergantung pada listrik konvensional, misalnya dengan menambahkan panel surya dan sensor lainnya. Meski demikian, ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan untuk pengembangan sistem ini di masa depan, seperti keandalan sensor dalam kondisi lingkungan yang beragam.

Pemilihan sensor yang tepat dan kalibrasi yang baik dapat meningkatkan akurasi pengukuran dan kinerja sistem secara keseluruhan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem otomatisasi untuk pertanian hidroponik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Kamelia, M. A. Ramdhani, A. Faroqi, & V. Rifadiapriyana, "Implementation of Automation System for Humidity Monitoring and Irrigation System," *IOP Conference Series Material Science. and Engineering*, Bandung, Indonesia, 288 012092, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/288/1/012092.
- [2] B. Yep & Y. Zheng, "Aquaponic Trends and Challenges – A review," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 228, pp. 1586–1599, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.290.
- [3] T. A. Babatunde, B. Abdulkarim, N. H. Wagini, S. A. Usman, L. A. Argungu, & U. Lawal, "Response of Germination and Seedling Growth of Jute Plant (*Corchorus olitorius* L.) on Three Different Substrates in the Tilapia Aquaponic System," *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 10, 100366, 2022, doi: 10.1016/j.jafr.2022.100366.
- [4] Z. Schmutz, J. C. Walser, C. A. Espinal, F. Gartmann, B. Scott, J. F. Pothier, E. Frossard, R. Junge, & T. H. M. Smits, "Microbial Diversity Across Compartments in an Aquaponic System and its Connection to the Nitrogen Cycle," *Sci. Total Environ.*, Vol. 852, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158426.
- [5] S. A. Gillani, R. Abbasi, P. Martinez, & R. Ahmad, "Review on Energy Efficient Artificial Illumination in Aquaponics," *Cleaner and Circular Bioeconomy*, Vol. 2, 100015, Agustus 2022, doi: 10.1016/j.clcb.2022.100015.
- [6] V. Ondruška, B. S. How, M. Netolický, V. Máša, & S. Y. Teng, "Resource Optimisation in Aquaponics Facility via Process Monitoring and Graph-Theoretical Approach," *Carbon Resources Conversion*, Vol. 5, No. 4, pp. 255–270, 2022, doi: 10.1016/j.crcon.2022.04.003.
- [7] I. Putra, N. A. Pamukas, & R. Rusliadi, "Peningkatan Kapasitas Produksi Akuakultur pada Pemeliharaan Ikan Selais (*Ompok* sp) Sistem Aquaponik," *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–10, 2013, doi: 10.31258/jpk.18.1.1-10.
- [8] A. R. Yanes, P. Martinez, & R. Ahmad, "Towards automated Aquaponics: A Review on Monitoring, IOT, and Smart Systems," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 263, 121571, Agustus 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121571.
- [9] I. Zidni, T. Herawati, & E. Liviawaty, "Pengaruh Padat Tebar Terhadap Pertumbuhan Benih Lele Sangkuriang (*Clarias gariepinus*) dalam Sistem Akuaponik," *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, Vol. 4, No. 4, pp. 315–324, 2013.
- [10] M. F. Taha, G. ElMasry, M. Gouda, L. Zhou, N. Liang, A. Abdalla, D. Rousseau, & Z. Qiu., "Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview," *Chemosensors*, Vol. 10, No. 8, 303, 2022, doi: 10.3390/chemosensors10080303.
- [11] B. König, J. Janker, T. Reinhardt, M. Villarroel, & R. Junge, "Analysis of Aquaponics as an Emerging Technological Innovation System," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 180, pp. 232–243, April 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.037.
- [12] Z. Khiari, K. Alka, S. Kelloway, B. Mason, & N. Savidov, "Integration of Biochar Filtration into Aquaponics: Effects on Particle Size Distribution and Turbidity Removal," *Agricultural Water Management*, Vol. 229, 105874, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.agwat.2019.105874.
- [13] A. Farooq, A. K. Verma, C. M. Hittinahalli, N. Harika, & M. Pai, "Iron Supplementation in Aquaculture Wastewater and its Effect on the Growth of Spinach and *Pangasius* in Nutrient Film Technique Based Aquaponics," *Agricultural Water Management*, Vol. 277, 108126, Maret 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2022.108126.