

RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL PINTAR BERBASIS ARDUINO UNTUK AKUAPONIK DENGAN TEKNOLOGI BIOFLOK

ARKA DWINANDA SOEWONO^{1*}, FEBRIAN ANDIKA GUNARKO¹, RORY ANTHONY HUTAGALUNG², CHRISTIAND¹

Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya^{1,2}

email: arka.soewono@atmajaya.ac.id^{1*}, rory.hutagalung@atmajaya.ac.id²

DOI: <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v7i1.3928>

Abstract: *Akuaponik merupakan sistem budidaya yang menggabungkan metode hidroponik dan akuakultur dalam lingkungan yang bersifat saling menguntungkan dan efisien. Akuaponik bila dipadukan dengan teknologi bioflok dapat menghasilkan sistem budidaya tanaman dan ikan yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah buangan (zero waste). Tantangan terbesar dari akuaponik adalah kondisi derajat keasaman (pH) dan jumlah padatan terlarut (Total Dissolve Solid atau TDS) pada air yang diperlukan untuk budidaya tanaman dan ikan umumnya bertolak belakang. Oleh sebab itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan mengembangkan sistem kontrol pintar berbasis Arduino yang dapat digunakan untuk untuk mengendalikan kadar pH dan TDS pada akuaponik dengan bioflok. Pengujian purwarupa sistem kontrol pintar tersebut dilakukan pada akuaponik sederhana di dalam ruangan untuk membudidayakan kangkung dan ikan lele Sangkuriang selama dua minggu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa akuaponik dengan sistem kontrol pintar menghasilkan tanaman kangkung dengan ukuran rata-rata 10 cm lebih panjang. Selain itu, ikan lele yang dihasilkan oleh akuaponik dengan sistem kontrol pintar memiliki rata-rata massa 0,5 gram lebih berat dan tingkat kematian 12% lebih rendah dibandingkan dengan akuaponik kontrol manual. Hasil budidaya tanaman dan ikan yang lebih baik dikarenakan keberadaan sistem kontrol pintar menjaga suhu, pH dan TDS pada air yang tersirkulasi pada kondisi ideal. Hal ini juga membantu meningkatkan kandungan bioflok yang dihasilkan oleh akuaponik sistem selama pengujian.*

Keywords: *Akuaponik, Arduino, Bioflok, Perancangan, Sistem Kontrol*

A. Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk yang sangat pesat mengakibatkan dampak negatif terhadap masalah keterbatasan lahan, ketahanan pangan dan lingkungan. Ledakan penduduk menyebabkan kebutuhan pangan makin meningkat sementara ketersediaan lahan untuk produksi pangan makin terbatas. Selain itu, meningkatnya produksi pangan juga secara langsung dapat menurunkan kualitas lingkungan, yang diperburuk oleh sistem budidaya yang tidak ramah lingkungan. Sistem budidaya yang ramah lingkungan dan berkesinambungan seperti akuaponik merupakan solusi yang tepat untuk untuk mengatasi masalah-masalah tersebut.

Akuaponik merupakan sistem budidaya yang menggabungkan akuakultur dan hidroponik dalam satu sistem terintegrasi yang bersifat saling menguntungkan dan efisien. Proses kerja akuaponik adalah sebagai berikut: air berisi kotoran (sisa pakan dan ekskresi) yang terakumulasi dari budidaya ikan di kolam akuakultur akan dialirkan ke bagian hidroponik dimana kotoran akan dimanfaatkan oleh tanaman dengan memecahnya menjadi nitrat dan nitrit melalui proses alami yang kemudian dapat digunakan sebagai nutrisi untuk menyuburkan tanaman pada sistem. Air kemudian bersirkulasi kembali ke sistem akuakultur. Dengan demikian secara teori tercipta sistem sirkulasi tertutup tanpa sisa buangan (*zero waste*) (Love et al., 2014). Beberapa kelebihan dari sistem akuaponik antara lain: mengurangi penggunaan lahan tanaman, mengurangi penggunaan air dalam budi daya ikan, mempercepat pertumbuhan tanaman, mengurangi limbah kotoran ikan, mempermudah mengatur lingkungan budi daya ikan (Shafahi & Woolston, 2014).

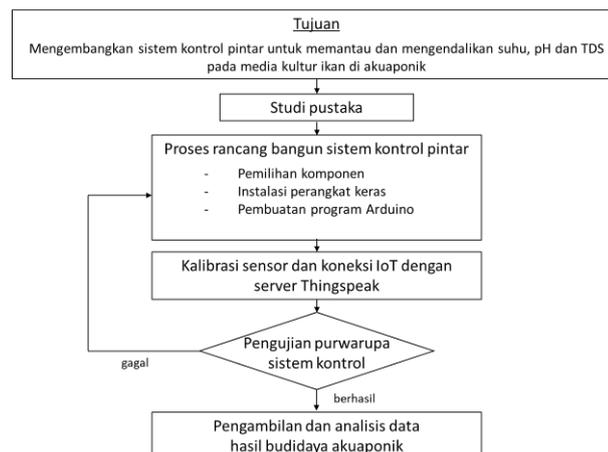
Mengingat potensi besar akuaponik sebagai metode budidaya berkelanjutan, banyak penelitian telah difokuskan untuk membuat sistem akuaponik lebih efisien (Prayogo et al., 2021; Priadi et al.,

2019; Sarmiento et al., 2020). Berdasarkan penelitian lampau, salah satu metode untuk meningkatkan hasil produksi dari sistem akuaponik adalah dengan menambahkan jumlah makanan yang diberikan kepada ikan (Halim et al., 2019). Akan tetapi, peningkatan jumlah pakan dapat mengakibatkan penurunan kualitas air di kolam akuakultur. Sisa makanan dan kotoran ikan dalam jumlah besar menyebabkan peningkatan populasi bakteri yang akan mempercepat proses pembusukan sisa organik di kolam (media kultur ikan) dan mengurangi kadar oksigen di air (Huang et al., 2021). Masalah ini bila dibiarkan dapat menyebabkan dampak negatif terhadap keberlanjutan sistem akuaponik. Salah satu solusi untuk menanggulangi masalah tersebut, teknologi bioflok dapat digunakan. Teknologi Bioflok memanfaatkan bakteri pembentuk flok (*Flocs Forming Bacteria*) untuk mengolah sisa kotoran menjadi pakan tambahan ikan (Ahmad et al., 2017).

Penelitian tentang akuaponik dengan sistem bioflok masih sangat terbatas. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kunci keberhasilan dari sistem akuaponik yang terintegrasi dengan teknologi Bioflok tergantung pada pemantauan rutin dan pengendalian parameter lingkungan di media kultur ikan, khususnya derajat keasaman (pH) dan Total Dissolved Solids (TDS) (da Rocha et al., 2017; Kyaw & Ng, 2017). Oleh sebab itu, tujuan utama dari Penelitian ini adalah untuk merancang dan mengembangkan sistem kontrol pintar yang dapat mensinergikan budidaya ikan dan pertumbuhan tanaman pada akuaponik dengan memantau kadar pH dan TDS di media kultur ikan dengan menggunakan sensor dan mengendalikan sistem sesuai kebutuhan. Selain itu, data temperatur, pH dan TDS akan disajikan melalui *webservice Thingspeak*. Sistem kontrol pintar ini kemudian akan diuji pada akuaponik sederhana untuk mengkaji dampaknya terhadap hasil produksi ikan dan tanaman.

B. Metode Penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Penelitian ini dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap rancang bangun purwarupa sistem kontrol pintar untuk akuaponik dan tahap pengujian. Proses perancangan mengikuti metode Pahl dan Beitz (Pahl et al., 2007; Weiss & Hari, 2015) dengan mempertimbangkan aspek ukuran alat, biaya dan kemudahan penggunaan. Arduino dipilih sebagai basis dari perancangan sistem kontrol pintar karena murah dan mudah dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

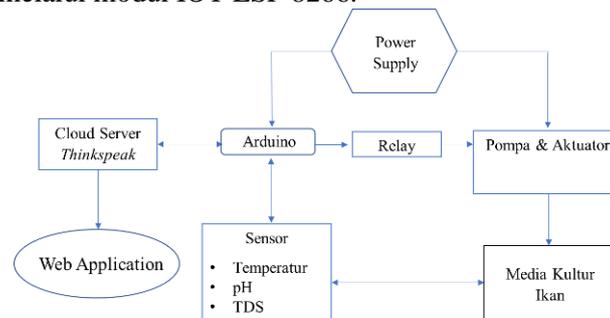
Sistem kontrol pintar dirancang menggunakan modul sensor temperatur, pH, dan TDS untuk mengukur suhu, pH, dan kandungan padatan terlarut dalam air. Spesifikasi sensor yang dipilih dapat dilihat pada Tabel 1. Sensor-sensor yang dihubungkan pada arduino digunakan untuk memperoleh data dari akuaponik yang kemudian disimpan dalam *cloud server Thingspeak*. Alasan utama pemilihan *Thingspeak* yaitu: layanan ini tidak berbayar dan memiliki kuota penyimpanan data yang besar; kesederhanaan dalam pengiriman data dari Arduino ke *Thingspeak*; data dapat diakses secara

realtime melalui laman thingspeak.com kapan saja dan dapat diakses pada semua perangkat yang memiliki *web browser*.

Tabel 1. Spesifikasi Sensor

Sensor Temperatur DS18B20 Probe Stainless
- <i>Probe Length</i> : 100cm
- <i>Input Voltage</i> : 3.0V ~ 5.5V
- <i>Temperature Range</i> : -55 ~ +125
- <i>Measurement Accuracy</i> : $\pm 5\%$
Sensor TDS Gravity Analog TDS Sensor Meter
- <i>Input Voltage</i> : 3.3 ~ 5.5V
- <i>Output Voltage</i> : 0 ~ 2.3V
- Working Current: 3 ~ 6mA
- <i>TDS Measurement Range</i> : 0 ~ 1000ppm
- <i>TDS Measurement Accuracy</i> : $\pm 10\%$ F.S.
Sensor pH Gravity pH Sensor Module V.1.1
- <i>Input Voltage</i> : 5.00V
- <i>Measuring Range</i> :0 – 14pH
- <i>Measuring Temperature</i> : 0 - 60°C
- <i>Measurement Accuracy</i> : ± 0.1 pH

Diagram perancangan sistem untuk purwarupa sistem kontrol pintar akuaponik berbasis Arduino dapat dilihat pada Gambar 2. Mikrokontroler Arduino berfungsi untuk menerima data dari sensor temperatur, pH dan TDS. Data yang didapat dari sensor kemudian diolah oleh Arduino. Jika ada data yang melewati batas parameter yang telah ditentukan, Arduino akan mengaktifkan aktuator (pompa) melalui bantuan *relay*. Pada saat bersamaan, data temperatur, pH dan TDS diunggah ke server *Thingspeak* oleh Arduino melalui modul IOT ESP 8266.



Gambar 2. Diagram Perancangan Sistem untuk Sistem Kontrol Pintar

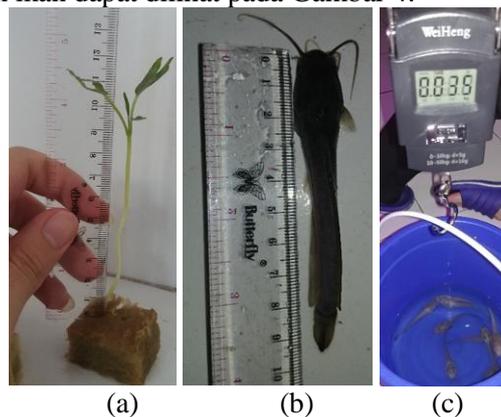
Purwarupa sistem kontrol pintar diuji coba pada aquaponik sederhana dengan kondisi percobaan dalam ruangan (*indoor experiment*) selama 2 minggu. Sistem akuaponik sederhana ini terdiri dari dua akuarium dengan ukuran 50 x 30 x 25 cm sebagai media kultur untuk ikan lele, dan sistem hidroponik 8 lubang dengan media tanam *rockwool* untuk budidaya tanaman kangkung. Dapat dilihat pada Gambar 3, akuaponik sebelah kanan dilengkapi dengan sistem kontrol pintar, sedangkan sebelah kiri dijalankan secara manual dengan pengawasan manusia.



Gambar 3. Pengujian Akuaponik Dengan Sistem Kontrol Pintar (kanan), dan Manual (kiri)

Bakteri bioflok yang digunakan dalam Penelitian ini adalah BACFLOC dengan kadar 10 ml/m^3 . Setelah diberi bioflok untuk mendorong perkembangbiakan bakteri yang menguntungkan, media kultur didiamkan selama 7 hari sebelum benih ikan dimasukkan. Larutan *pH-Up* dan *pH-Down* dipakai untuk mengendalikan kadar keasaman pada air di akuarium, sedangkan larutan *AB Mix* digunakan menjaga kadar TDS dengan menambahkan kandungan nutrisi terlarut dalam air. Agar pertumbuhan tanaman kangkung dan ikan lele optimal, batas parameter untuk akuaponik yang telah ditentukan untuk pengujian adalah: pH antara 6 – 8, dan TDS antara 1000 ppm – 1500 ppm. Sebanyak 50 (lima puluh) ekor ikan lele Sangkuriang (*Clarias gariepinus*) dan 4 (empat) buah tanaman kangkung (*Ipomea aquatic*) dibudidayakan untuk setiap akuaponik pada saat pengujian.

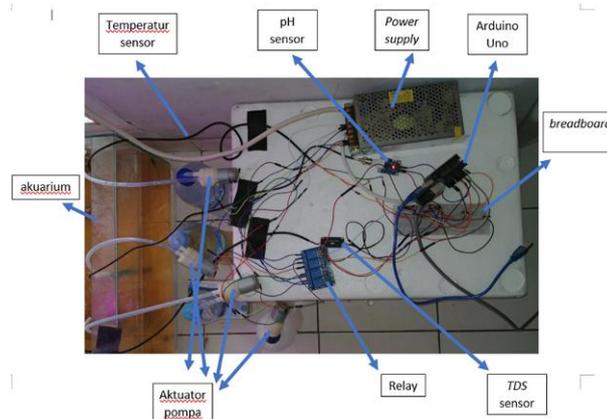
Data temperatur, pH dan TDS di kedua akuarium juga dimonitor secara manual sebanyak 3 kali per sehari selama pengujian dengan menggunakan alat ukur digital EZ 9909 TDS dan pH meter. Untuk akuaponik dengan perlakuan manual, larutan pH *Up/* pH *Down* dan *AB mix* ditambahkan secara bertahap bila diperlukan. Data pertumbuhan tanaman kangkung dan ikan lele diambil sebanyak 5 kali dengan interval setiap 3 hari sekali. Untuk pertumbuhan kangkung, data yang diukur adalah pertumbuhan tinggi tanaman untuk seluruh tanaman yang dibudidayakan. Untuk ikan lele, data yang diambil yaitu penambahan panjang dan massa dari ikan. Data pertumbuhan ikan lele diukur dengan mengambil sampel sebanyak 10 ekor ikan secara acak dengan pengulangan sebanyak 3 kali. Proses pengukuran data tanaman dan ikan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengukuran Panjang Tanaman (a), Panjang Ikan (b) dan Berat Ikan (c)

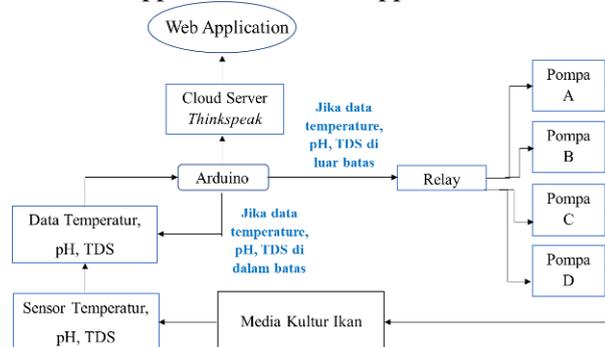
C. Hasil dan Pembahasan

Proses rancang bangun purwarupa sistem kontrol pintar untuk akuaponik dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno yang dipasangkan dengan modul sensor temperatur, pH, dan TDS untuk memonitor dan mengatur nilai temperatur, pH, dan jumlah padatan terlarut dalam air telah berhasil dilaksanakan. Perwujudan rangkaian Arduino, modul sensor, *relay*, dan aktuator dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perwujudan Sistem Kontrol Akuaponik Berbasis Arduino

Sensor temperatur, pH, dan TDS diatur agar mengirimkan data hasil pengukuran setiap 15 detik. Data *input* dari sensor akan ditampung dan diolah oleh Arduino untuk menentukan setiap aksi dari aktuator pompa seperti yang ditunjukkan pada diagram kerja di Gambar 6. Seluruh pompa menggunakan *on/off relay* yang akan bekerja jika data yang diperoleh melewati batas parameter yang ditentukan yaitu nilai $6 < \text{pH} < 8$ dan $1000 \text{ ppm} < \text{TDS} < 1500 \text{ ppm}$.

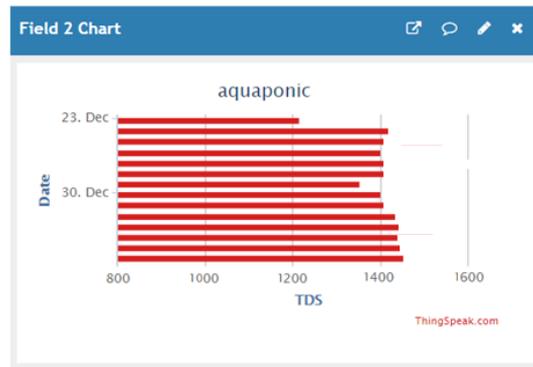


Keterangan :

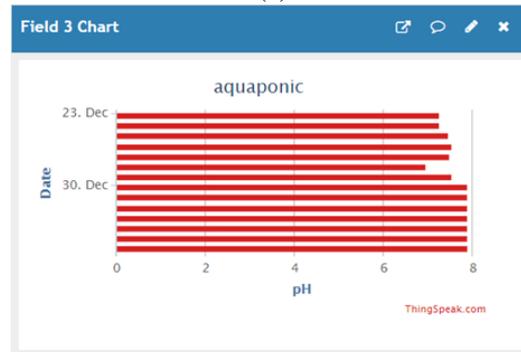
- A = memompa cairan *AB Mix* untuk menaikkan *TDS*
- B = memompa air untuk menurunkan *TDS*
- C = memompa cairan *pH-Up* untuk menaikkan *pH*
- D = memompa cairan *pH-Down* untuk menurunkan *pH*

Gambar 6. Diagram Kerja Sistem Kontrol Akuaponik Berbasis Arduino

Sistem kontrol pintar ini akan menyalakan pompa A untuk memompa cairan *AB Mix* bila TDS yang terbaca oleh sensor berada dibawah 1000 ppm. Jika TDS di atas 1500 ppm, pompa B akan memompa air yang telah disaring untuk menurunkan kadar padatan air akuarium. Bila pH yang terbaca oleh sensor berada dibawah 6 atau di atas 8, maka pompa C atau D akan menyala untuk menaikkan atau menurunkan pH dengan menggunakan cairan *pH-Up* dan *pH-Down*. Data hasil pengukuran sensor temperatur, pH, dan TDS disimpan secara otomatis di *server Thingspeak* dengan tampilan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Dari hasil kalibrasi pembacaan sensor Arduino terhadap hasil pengukuran manual dengan menggunakan alat ukur TDS dan pH *meter* ditemukan bahwa hasil pengukuran sensor TDS dan pH untuk sistem kontrol pintar memiliki perbedaan kurang dari 2% dengan rata-rata *time lag (delay)* berkisar antara 48 -60 detik. *Delay* dari pembacaan hasil pengukuran dengan sensor Arduino yang ditampilkan di *Thingspeak* disebabkan karena koneksi internet yang tidak stabil.



(a)



(b)

Gambar 7. Data Rata-Rata Harian TDS (a) dan pH (b) pada *Thingspeak*

Untuk mengamati secara kuantitatif pengaruhnya terhadap hasil budidaya akuaponik, purwarupa sistem kontrol pintar berbasis Arduino diuji pada sistem akuaponik sederhana untuk membudidayakan tanaman kangkung dan ikan lele. Penelitian ini akan membandingkan data pertumbuhan kangkung, dan ikan lele yang dihasilkan oleh akuaponik dengan sistem kontrol pintar terhadap hasil akuaponik dengan kontrol manual

Perbandingan data pertumbuhan panjang tanaman kangkung yang dialiri air dari akuarium dengan sistem kontrol pintar dan kontrol manual selama periode pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pertumbuhan Tanaman Kangkung

Tangg al	Panjang Tanaman (cm)							
	Akuaponik dengan Kontrol Pintar				Akuaponik dengan Kontrol Manual			
	Tanaman ke -				Tanaman ke -			
	1	2	3	4	5	6	7	8
23 Des	6	8, 5	8	8	8	1, 5	9	7,5
26 Des	10	12	1 2	1 2	9	4	1 2	9
29 Des	16	17	1 4	1 4	13	5	1 4	12
1 Jan	20	22	1 7	1 7	14	7	1 4	16
4 Jan	26	27	2 1	2 1	16, 5	10	1 6	17, 5

Dari hasil pengukuran data pertumbuhan tanaman kangkung dari tanggal 23 Desember – 4 Januari. Tanaman no. 1–4 yang dibudidayakan pada akuaponik dengan sistem kontrol pintar menghasilkan rata-rata pertumbuhan sebesar 16,13 cm. Sedangkan pada tanaman no. 5–8 yang dibudidayakan pada akuaponik dengan kontrol manual hanya memiliki rata-rata pertumbuhan sebesar 15 cm.

Data rata-rata panjang ikan lele yang diambil dari akuaponik dengan dan tanpa sistem kontrol pintar terangkum pada Tabel 3. Pada awal pengujian (23 Desember), benih ikan lele pada kedua akuaponik memiliki panjang yang serupa secara statistik. Akuaponik dengan sistem kontrol pintar menghasilkan ikan lele dengan rata-rata panjang 9,51 cm (dengan standar deviasi 0,05 cm), sedangkan sistem akuaponik dengan kontrol manual menghasilkan ikan lele dengan rata-rata panjang 9,00 cm (dengan standar deviasi 0,04 cm) pada akhir pengujian.

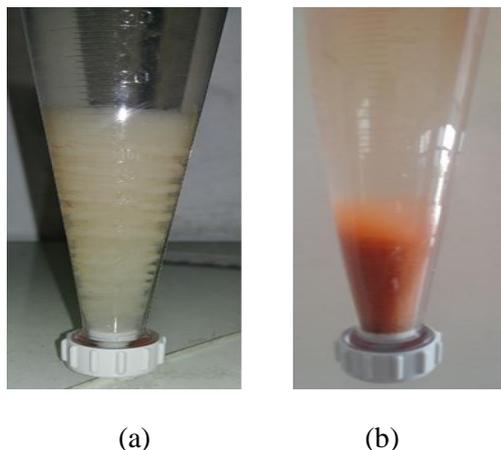
Tabel 3. Data Panjang Ikan Lele

Tang gal	Rata-Rata Panjang Ikan Lele (cm)					
	Akuaponik dengan Kontrol Pintar			Akuaponik dengan Kontrol Manual		
	Pengulangan ke -					
	1	2	3	1	2	3
23 Des	6,4 5	6,4 3	6,3 5	6,3 2	6,4 0	6,2 9
26 Des	7,5 3	7,4 7	7,5 5	7,1 8	7,1 1	7,0 8
29 Des	8,2 4	8,3 5	8,0 4	7,9 1	7,8 7	7,9 5
1 Jan	9,0 6	9,1 0	9,1 3	8,5 2	8,4 7	8,4 8
4 Jan	9,5 3	9,5 4	9,4 5	9,0 1	8,9 7	9,0 4

Tabel 4 menunjukkan data rata-rata massa ikan lele akuaponik yang berasal dari akuaponik dengan sistem kontrol pintar dan kontrol manual. Mirip dengan data panjang ikan, benih ikan lele pada kedua akuaponik memiliki massa yang serupa sekitar $1,69 \pm 0,28$ gram di awal pengujian. Rata-rata berat ikan di akhir pengujian adalah $6,07 \pm 0,32$ gram dengan tingkat kematian (*mortality rate*) sebesar 10% (5 ekor ikan mati dari total 50 ekor) untuk sistem akuaponik pintar dan $5,53 \pm 0,35$ gram dengan tingkat kematian 22% (11 dari total 50) untuk sistem akuaponik dengan kontrol manual. Tingkat pertumbuhan ikan yang lebih tinggi serta tingkat kematian yang lebih rendah disebabkan karena suhu dan pH air dalam kondisi optimal untuk ikan. Selain itu, sistem kontrol pintar juga memastikan konsentrasi padatan (TDS) dalam air juga selalu terjaga pada level yang rendah sehingga tidak mempengaruhi kesehatan ikan (Setiadi et al., 2019; Yavuzcan Yildiz et al., 2019)

Tang gal	Rata-Rata Massa Ikan Lele (gram)					
	Akuaponik dengan Kontrol Pintar			Akuaponik dengan Kontrol Manual		
	Pengulangan ke -					
	1	2	3	1	2	3
23 Des	1,7 1	1,6 7	1,7 3	1,6 5	1,7 0	1,6 9
26 Des	3,5 1	3,4 8	3,4 9	3,2 1	3,0 4	3,1 8
29 Des	4,1 8	4,3 2	4,2 4	3,9 7	4,0 5	3,9 8
1 Jan	5,5 1	5,4 3	5,4 9	4,5 9	4,6 3	4,4 8
4 Jan	6,0 6	6,1 1	6,0 5	5,5 0	5,5 3	5,5 7

Pengukuran kandungan bioflok dalam akuarium dilakukan pada akhir pengujian dengan menggunakan *Imhoff cone* seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Kandungan bioflok pada akuaponik yang dilengkapi dengan sistem kontrol pintar sebesar 17 ml per 1 liter air, sedangkan akuaponik dengan kontrol manual menghasilkan kandungan bioflok sebesar 3 ml per 1 liter air. Akuaponik dengan sistem kontrol pintar menghasilkan kandungan bioflok yang lebih banyak. Dikarenakan kadar pH pada media kultur ikan selalu dalam kondisi yang optimal untuk pertumbuhan bakteri bioflok. Keberadaan bioflok yang lebih melimpah berdampak pada penambahan pakan bagi ikan. Hal ini menyebabkan ikan lele yang dihasilkan pada akuaponik dengan sistem kontrol pintar memiliki rata-rata berat yang lebih besar dibandingkan dengan akuaponik kontrol manual.



Gambar 8. Kandungan Bioflok pada Akuaponik dengan Sistem Kontrol Pintar (a) dan Manual (b)

D. Penutup

Purwarupa sistem kontrol pintar berbasis Arduino untuk akuaponik telah berhasil dirancang dan diwujudkan. Sistem kontrol tersebut telah sukses diuji pada akuaponik yang terintegrasi dengan teknologi bioflok untuk membudidayakan tanaman kangkung dan ikan lele Sangkuriang. Hasil

pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol pintar memberikan dampak yang cukup signifikan pada hasil budidaya tanaman dan ikan. Tanaman kangkung yang dialiri air dari akuarium dengan sistem kontrol pintar menghasilkan tangkai yang lebih panjang. Selain itu, pertumbuhan ikan lele pada akuaponik dengan sistem kontrol pintar menghasilkan ikan dengan massa 9,78% lebih berat dibandingkan dengan akuaponik kontrol manual pada akhir pengujian. Hasil budidaya tanaman dan ikan serta yang lebih baik pada sistem akuaponik pintar dikarenakan air yang disirkulasikan di dalam sistem selalu dijaga dalam kondisi suhu, pH dan TDS yang ideal. Hal ini juga membuat produksi bioflok menjadi lebih optimal.

Daftar Pustaka

- Ahmad, I., Babitha Rani, A. M., Verma, A. K., & Maqsood, M. (2017). Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition. *Aquaculture International*, 25(3), 1215–1226. <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0108-8>
- da Rocha, A., Filho, M. L. B., Stech, M. R., & da Silva, R. P. (2017). Lettuce Production In Aquaponic and Biofloc Systems with Silver Catfish. *Rhamdia quelen*. *BOLETIM DO INSTITUTO DE PESCA*, 43. <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2017.64.73>
- Halim, M. A., Nahar, S., & Nabi, M. M. (2019). Biofloc Technology In Aquaculture and Its Potentiality: A Review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(5), 260–266.
- Huang, C.-C., Lu, H.-L., Chang, Y.-H., & Hsu, T.-H. (2021). Evaluation of the Water Quality and Farming Growth Benefits of an Intelligence Aquaponics System. In *Sustainability* (Vol. 13, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/su13084210>
- Kyaw, T. Y., & Ng, A. K. (2017). Smart Aquaponics System for Urban Farming. *Energy Procedia*, 143, 342–347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.694>
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An International Survey of Aquaponics Practitioners. *PLOS ONE*, 9(7), e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Pahl, G., Beitz, W., Jörg Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (3rd ed.). Springer.
- Prayogo, Agustono, Budi Sa, R., & Mo, A. (2021). Growth performance and nutrient composition of mustard green (*Brassica juncea*) cultured in aquaponics systems and hydroponic system. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 10(3), 373–379.
- Priadi, D., Wibowo, H., & Mulyaningsih, E. S. (2019). The growth optimization of pak choy (*Brassica rapa* L. var. *chinensis*) in household-scale aquaponics system. *Biodjati*, 4(2), 175–183.
- Sarmiento, R. L. T., Hakim, R. R., & Hermawan, D. (2020). The effect of AB Mix nutrition on growth performance of catfish (*Clarias gariepinus*) and lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in aquaponic systems. *Indonesian Journal of Tropical Aquatic*, 3(2), 87–94.
- Setiadi, E., Taufik, I., Widyastuti, Y. R., Ardi, I., & Puspaningsih, D. (2019). Improving productivity and water quality of catfish, *Clarias* sp. cultured in an aquaponic ebb-tide system using different filtration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 236, 12026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/236/1/012026>
- Shafahi, M., & Woolston, D. (2014). *Aquaponics: A Sustainable Food Production System*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39441>
- Weiss, M. P., & Hari, A. (2015). Extension of the Pahl & Beitz Systematic Method for Conceptual Design of a New Product. *Procedia CIRP*, 36, 254–260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.010>
- Yavuzcan Yildiz, H., Radosavljevic, V., Parisi, G., & Cvetkovikj, A. (2019). *Insight into Risks in Aquatic Animal Health in Aquaponics BT - Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (eds.); pp. 435–452). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_17