

## Pertanian Terpadu: Prospek, Tantangan, dan Inovasi dalam Budidaya Terpadu Ikan dan Tanaman dalam Sistem Akuaponik

### *Integrated Farming: Prospects, Challenges, and Innovations in Integrated Fish and Plant Cultivation in Aquaponic Systems*

Ida Ayu Widhiantari<sup>1,2\*</sup>, Wayan Wangiyana<sup>1,3</sup>, Husnul Jannah<sup>1,4</sup>, Hanifah Ayu<sup>1,2</sup>, Siska Cicilia<sup>1,2</sup>, Sudarli<sup>1,5</sup>

<sup>1)</sup>(Program Doktor Pertanian Berkelanjutan, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

<sup>2</sup>(Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

<sup>3</sup>(Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

<sup>4</sup>(Fakultas Sains Teknik dan Terapan, Universitas Pendidikan Mandalika, Mataram, Indonesia;

<sup>5</sup>(Dinas Pendidikan dan Kebudayaan, Kabupaten Sumbawa, Indonesia.

\*corresponding author, email: [ida.ayuwidhiantari@unram.ac.id](mailto:ida.ayuwidhiantari@unram.ac.id)

#### ABSTRAK

Akuaponik merupakan sistem pertanian terintegrasi, yang menggabungkan akuakultur dan hidroponik dalam sebuah sirkulasi tertutup. Sistem ini memanfaatkan limbah nitrogen dari ikan yang diubah oleh bakteri menjadi unsur hara bagi tanaman, yang pada gilirannya menyaring air untuk dikembalikan ke kolam ikan. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis prospek, inovasi terkini, dan tantangan dalam budidaya pertanian secara akuaponik, khususnya dalam aspek kinerja biologis, integrasi teknologi, dan kelayakan ekonomi. Metode yang digunakan adalah kajian komprehensif terhadap berbagai hasil penelitian terdahulu yang membahas komponen sistem, pemilihan spesies, manajemen nutrisi, serta implementasi teknologi seperti Internet of Things (IoT). Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi sensor dan mikrokontroler memungkinkan pemantauan dan kontrol parameter kunci (seperti pH, suhu, amonia) secara real-time, yang sangat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem. Secara biologis, larutan nutrisi dari sistem akuaponik yang diperkaya atau complemented aquaponic (CAP) dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, seperti selada, hingga 39% lebih tinggi dibandingkan dengan sistem hidroponik konvensional, yang diduga akibat adanya senyawa organik dan mikroba yang merangsang pertumbuhan (PGPR). Namun demikian, profitabilitas sangat bergantung pada skala ekonomi dan strategi pemasaran, sedangkan diversifikasi produk olahan seperti fillet juga dapat meningkatkan Return on Investment (ROI). Tantangan utama ke depan adalah pengelolaan nutrisi, khususnya pendaurulangan fosfor dan kalium dari lumpur padat melalui teknologi mineralisasi yang efisien untuk mencapai sistem yang benar-benar berkelanjutan.

**Kata kunci:** akuakultur; akuaponik; cap; hidroponik; pertanian\_terpadu

#### ABSTRACT

*Aquaponics is an integrated agricultural system that combines aquaculture and hydroponics in a closed-loop system. This system utilizes nitrogenous waste from fish that is converted by bacteria into nutrients for plants, which in turn filter the water to be returned to the fish pond. This study aims to analyze the prospects, current innovations, and challenges in aquaponic farming, particularly in terms of biological performance, technology integration, and economic feasibility. The method used is a comprehensive review of various previous research results that discuss system components, species selection, nutrient management, and the implementation of technologies such as the Internet of Things (IoT). The analysis results show that the integration of sensors and microcontrollers allows for real-time monitoring and control of key parameters (such as pH, temperature, ammonia), which significantly improves system efficiency and stability. Biologically, nutrient solutions from enriched or complemented aquaponics (CAP) systems can increase plant growth, such as lettuce, by up to 39% compared to conventional hydroponic systems, thought to be due to the presence of organic compounds and growth-promoting microbes (PGPR). However, profitability is highly dependent on economies of scale and marketing strategies, while diversification of processed products such as fillets can also increase Return on Investment (ROI). The main challenge going forward is nutrient management, particularly the recycling of phosphorus and potassium from solid sludge through efficient mineralization technologies to achieve a truly sustainable system.*

**Keywords:** aquaculture; aquaponic; cap; hydroponics; integrated\_farming

## PENDAHULUAN

Akuaponik merupakan sebuah konsep pertanian terpadu yang menggabungkan akuakultur (budidaya ikan atau hewan air lainnya) dengan hidroponik (budidaya tanaman tanpa tanah) dalam sebuah sistem resirkulasi air (L A Ibrahim *et al.*, 2023); (Rudoy *et al.*, 2025). Teknologi inovatif ini didasarkan pada hubungan simbiosis antara tiga komponen utama: ikan, tanaman, dan mikroorganisme (Sunardi *et al.*, 2021). Prinsip kerjanya adalah memanfaatkan limbah dari budidaya hewan air, yang kaya akan amonia, untuk diubah oleh bakteri nitrifikasi menjadi nitrat yang merupakan nutrisi bagi tanaman (Neforawati *et al.*, 2016). Tanaman kemudian menyerap nutrisi ini, sekaligus membersihkan air yang akan disirkulasikan kembali ke kolam ikan (Sundari *et al.*, 2021).

Produksi perikanan budidaya air tawar menurut jenis pemberian per tahun 2023 di wilayah Kota Mataram sendiri, dalam kaitan dengan pertanian terpadu ini, lebih tinggi dibandingkan tahun sebelumnya yaitu 392 ton, sedangkan tahun 2022 sebesar 378 ton yang terdiri atas ikan mas 9 ton, ikan nila 217 ton, ikan gurami 25 ton, lele 50 ton, bawal 74 ton, dan jenis ikan lainnya 2 ton (BPS Kota Mataram, 2024). Jenis ikan budidaya terbanyak yaitu ikan nila. Ikan nila termasuk jenis budidaya ikan air tawar yang tidak begitu sulit dalam perwatannya dan mudah berkembang. Sebaliknya, untuk budidaya tanaman sayuran semusim didominasi oleh budidaya sawi dengan hasil sebesar 6.638,00 kwintal, disusul oleh kangkung dengan hasil 3.639,90 kwintal. Produksi tanaman lainnya berdasarkan BPS Kota Mataram per tahun 2024 diantaranya bawang merah, bayam, buncis, cabai rawit, kacang panjang, melon, semangka, terung, tomat, cabai besar, cabai keriting, dan jamur tiram. Potensi budidaya ikan dan sayuran Kota Mataram dapat diperluas dengan penerapan teknik budidaya yang berbeda yaitu budidaya sistem akuaponik yang mengintegrasikan antara tanaman dan ikan, sehingga dapat meningkatkan ketahanan pangan.

Dalam siklus simbiotik akuaponik, menjelaskan bahwa ikan dipelihara dalam kolam/tangki. Ikan menghasilkan limbah (kotoran/urin) yang mengandung amonia (ammonia). Kotoran ikan (feces) dan sisa pakan terurai menjadi amonia ( $\text{NH}_3$ ). Amonia bersifat toksik bagi ikan dalam konsentrasi tinggi. Bakteri nitrifikasi (seperti Nitrosomonas dan Nitrobacter) mengonversi amonia menjadi senyawa yang kurang berbahaya melalui proses nitrifikasi. Prosesnya: Amonia ( $\text{NH}_3$ )  $\rightarrow$  Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ )  $\rightarrow$  Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Proses biologis ini dilakukan oleh bakteri yang mengubah amonia menjadi nitrat. Nitrat merupakan sumber nutrisi yang baik untuk tanaman. Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) diserap oleh tanaman sebagai pupuk alami. Nitrat relatif tidak berbahaya bagi ikan dalam konsentrasi normal. Tanaman tumbuh tanpa media tanah (hidroponik). Akar tanaman menyerap nitrat dan nutrisi lain dari air yang telah diproses oleh bakteri. Tanaman berfungsi sebagai filter alami yang membersihkan air sebelum dikembalikan ke kolam ikan. Berdasarkan pada pertumbuhan tanaman dan ikan yang dihasilkan, sistem ini dapat menghasilkan dua produk yaitu ikan yang dapat dipanen dan tanaman (bisa tanaman sayuran atau herbal). Pakan diberikan kepada ikan sebagai sumber energi dan nutrisi. Pakan yang tidak dimakan akan terurai menjadi amonia dan menjadi bagian dari siklus nutrisi. Sistem akuaponik ini memanfaatkan siklus nitrogen alami. Limbah nitrogen dari ikan diubah menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman.

Sistem akuaponik ini menawarkan berbagai keunggulan, terutama dalam hal efisiensi sumber daya. Dibandingkan dengan pertanian konvensional, akuaponik mampu mengurangi konsumsi air hingga lebih dari 90%, meminimalkan penggunaan pupuk anorganik, dan memungkinkan produksi pangan di lahan terbatas, termasuk di perkotaan (Ibrahim *et al.*, 2023; Rudoy *et al.*, 2025). Dengan meningkatnya tantangan global seperti kelangkaan air, degradasi kesuburan tanah, dan kebutuhan pangan yang terus bertambah, akuaponik menjadi salah satu solusi pertanian berkelanjutan yang sangat menjanjikan (Baganz *et al.*, 2022). Namun demikian, implementasinya juga dihadapkan pada berbagai tantangan teknis dan ekonomi, seperti biaya investasi awal yang tinggi, kompleksitas dalam menjaga keseimbangan ekosistem, serta perlunya pemahaman mendalam tentang berbagai disiplin ilmu (Soliman *et al.*, 2022; Ibrahim *et al.*, 2023).

Sebuah sistem akuaponik yang fungsional terdiri atas beberapa komponen kunci yang saling terintegrasi. Berdasarkan sumber-sumber yang dianalisis, komponen-komponen utama tersebut adalah:

- a. Unit Akuakultur: Komponen ini terdiri atas tangki pemeliharaan ikan sebagai tempat budidaya ikan atau hewan air lainnya (Rudoy *et al.*, 2025). Limbah yang dihasilkan ikan, terutama amonia dari insang dan feses, menjadi sumber nutrisi utama bagi tanaman dalam sistem (Naser *et al.*, 2019).

- b. Unit Filtrasi: Ini adalah bagian krusial untuk menjaga kualitas air. Unit ini terbagi menjadi:
- Filter Mekanis: Berfungsi untuk memisahkan limbah padat (feses dan sisa pakan) dari air (Rudoy *et al.*, 2025). Contohnya adalah tangki pengendapan (*clarifier* atau *settling tank*), *drum filter*, atau saringan sederhana. Limbah padat ini dapat diolah lebih lanjut melalui mineralisasi nutrisi (Delaide, 2017).
  - Biofilter: Merupakan media bagi bakteri nitrifikasi untuk berkembang biak dan melakukan proses konversi amonia menjadi nitrat. Bakteri yang berperan penting adalah *Nitrosomonas sp.* (mengubah amonia menjadi nitrit) dan *Nitrobacter sp.* atau *Nitrospira sp.* (mengubah nitrit menjadi nitrat) (Sunardi *et al.*, 2021). Biofilter bisa berupa unit terpisah atau terintegrasi dalam media tanam (Delaide, 2017; Ibrahim *et al.*, 2023).
- c. Unit Hidroponik: merupakan area budidaya tanaman. Terdapat beberapa teknik yang umum digunakan, antara lain:
- Media Tanam (*Media-based*): Menggunakan substrat inert seperti kerikil, arang, atau *expanded clay* sebagai penopang akar dan media biofiltrasi (Delaide, 2017).
  - *Deep Water Culture* (DWC) atau Rakit Apung: Akar tanaman terendam dalam air kaya nutrisi di dalam bak besar, dan tanaman disangga oleh rakit apung (Delaide, 2017).
  - *Nutrient Film Technique* (NFT): Akar tanaman dialiri lapisan tipis air bernutrisi secara terus-menerus di dalam talang atau pipa.
  - Kultur Pot: Tanaman ditanam dalam pot yang berisi substrat seperti gambut putih (*peat*) atau campuran media lainnya, yang kemudian diairi dengan air dari sistem akuakultur (Delaide, 2017; Sunardi *et al.*, 2021).
- d. Sump Tank (Bak Penampung): Merupakan titik terendah dalam sistem, yang berfungsi untuk menampung air yang telah melewati unit hidroponik sebelum dipompa kembali ke tangki ikan (Naser *et al.*, 2019; Ullah *et al.*, 2022).
- e. Sistem Pemantauan dan Kontrol dengan IoT: Seiring perkembangan teknologi, banyak sistem akuaponik modern dilengkapi dengan aplikasi *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan dan kontrol jarak jauh secara *real-time* seperti diuraikan oleh Ibrahim *et al.* (2023), Sunardi *et al.* (2021), dan Naser *et al.* (2019). Komponennya meliputi:
- Sensor: Untuk mengukur parameter penting seperti pH, suhu air, amonia (NH3), oksigen terlarut (DO), dan kekeruhan air (Sundari *et al.*, 2021; Ibrahim *et al.*, 2023).
  - Mikrokontroler: Seperti Raspberry Pi, Arduino Uno, atau NodeMcu, yang berfungsi memproses data dari sensor dan mengirimkannya ke server (Naser *et al.*, 2019; Sunardi *et al.*, 2021; Ibrahim *et al.*, 2023).
  - Aktuator: Perangkat seperti pompa air, pemberi pakan otomatis, lampu, dan kipas yang dapat dikontrol melalui antarmuka web atau aplikasi seluler.

Meskipun penelitian tentang akuaponik terus berkembang, beberapa kesenjangan teridentifikasi dari sumber-sumber ini yang menjadi gap penelitian, diantaranya sebagai berikut: a) Manajemen Nutrisi dan Mineralisasi Limbah: Masih diperlukan pemahaman yang lebih dalam tentang siklus nutrisi makro dan mikro. Perlu dikembangkan metode yang efisien dan terjangkau untuk mineralisasi lumpur guna mendaur ulang nutrisi, terutama fosfor, dan mengembalikannya ke sistem (Ibrahim *et al.*, 2023). b) Peran Mikrobioma dan Probiotik: Komunitas mikroba dalam akuaponik sangat kompleks dan perannya belum sepenuhnya dipahami. Pengembangan probiotik spesifik yang bermanfaat bagi ikan, tanaman, dan proses nitrifikasi secara simultan merupakan area yang sangat menjanjikan (Rudoy *et al.*, 2025). c) Teknologi Cerdas (Akuaponik 4.0): Integrasi teknologi canggih seperti kecerdasan buatan (AI) dan *machine learning* untuk analisis prediktif, optimalisasi otomatis, dan deteksi dini penyakit masih dalam tahap awal. Pengembangan sensor yang lebih murah, akurat, dan tahan lama juga menjadi tantangan (Ibrahim *et al.*, 2023). d) Skalabilitas dan Kelayakan Ekonomi: Diperlukan lebih banyak studi kasus tentang kelayakan ekonomi sistem akuaponik komersial skala besar di berbagai kondisi pasar dan iklim. Analisis rantai nilai, penerimaan pasar, dan model bisnis yang inovatif perlu dieksplorasi lebih lanjut (Pasch and Palm, 2021). e) Legislasi dan Sertifikasi: Belum adanya kerangka legislatif yang jelas dan standar sertifikasi organik untuk produk akuaponik di banyak negara menjadi hambatan bagi perkembangan industri dan kepercayaan konsumen (Joly *et al.*, 2015; Mchunu *et al.*, 2018; Ibrahim *et al.*, 2023). f) Kombinasi Spesies dan Adaptasi Lingkungan: Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi kombinasi ikan-tanaman yang optimal untuk berbagai tujuan (misalnya, produksi pangan, nilai ekonomi tinggi, atau adaptasi iklim) dan untuk mengembangkan sistem yang tangguh terhadap perubahan lingkungan (Ibrahim *et al.*, 2023; Knaus *et al.*, 2024).

Berdasarkan uraian di atas, rumusan masalah dalam tinjauan ini diantaranya: (a) bagaimana konsep dasar, komponen utama, dan mekanisme kerja simbiosis antar komponen (ikan, tanaman, bakteri) dalam sebuah sistem akuaponik; (b) bagaimana kinerja biologis sistem akuaponik dalam hal pertumbuhan ikan dan tanaman, efisiensi pakan, serta kestabilan kualitas air yang dimediasi oleh mikroorganisme; (c) sejauh mana inovasi teknologi terkini, seperti *Internet of Things* (IoT) dan probiotik, dapat diintegrasikan untuk meningkatkan efisiensi, kontrol otomatis, dan produktivitas sistem akuaponik; (d) faktor-faktor ekonomi apa saja yang menentukan kelayakan dan skalabilitas usaha akuaponik, serta bagaimana strategi untuk meningkatkan profitabilitas dan Return on Investment (ROI); (e) apa saja tantangan utama dan kesenjangan penelitian yang masih menghambat optimalisasi dan adopsi luas sistem akuaponik berkelanjutan. Tujuan dari tinjauan ini diantaranya: (a) menjelaskan konsep dasar dan komponen akuaponik; (b) menganalisis kinerja biologis sistem; (c) mengkaji inovasi teknologi terkini (IoT); (d) mengevaluasi aspek ekonomi dan skalabilitas; (e) mengidentifikasi tantangan dan kesenjangan penelitian.

## BAHAN DAN METODE

Metode yang diterapkan dalam penyusunan tinjauan jurnal ini adalah metode komparatif-analitis, sintesis, dan generalisasi. Pendekatan yang secara inheren merupakan analisis dan sintesis data yang sudah ada, yang secara umum dikenal sebagai studi tinjauan literatur atau tinjauan (*review*). Bahan yang digunakan untuk tinjauan ini adalah artikel ilmiah yang diterbitkan dalam publikasi yang ditinjau sejawat (*peer-reviewed*). Proses penelitian melibatkan pencarian sumber yang relevan di berbagai basis data referensi yang tersedia untuk umum sejumlah 16 referensi hasil kajian, seperti Science Direct, Research Gate, Google Scholar, National MedLine, Wiley online library, dan PubMed. Kajian ini dilakukan dengan pencarian sumber data dari tahun 2015 hingga 2025. Temuan dari berbagai studi dibandingkan dan digabungkan untuk mencapai kesimpulan baru.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengatasi tantangan dan meningkatkan produktivitas serta keberlanjutan sistem akuaponik, literatur menyoroti tiga inovasi kunci yang memanfaatkan teknologi dan biologi canggih: Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT), integrasi probiotik, dan pengembangan sistem *Complemented Aquaponics* (CAP).

### Pemanfaatan IoT

Penerapan IoT merevolusi akuaponik dari praktik tradisional menjadi pertanian presisi (*precision agriculture*) yang memungkinkan pemantauan dan pengelolaan jarak jauh, secara signifikan mengurangi kebutuhan waktu dan tenaga kerja (Sunardi *et al.*, 2021); (Lubna A Ibrahim *et al.*, 2023). Sistem IoT dirancang untuk memantau berbagai parameter penting secara waktunya (*real-time*). Parameter yang dapat diukur dan ditampilkan meliputi: tingkat pH, tingkat Amonia (NH<sub>3</sub>) menggunakan sensor seperti MQ135 atau melalui strip uji warna (< 1 mg/L), suhu air dan kelembapan (menggunakan sensor seperti DS18B20 atau DHT22), dimana suhu yang ideal untuk pertumbuhan ikan dan tanaman berkisar antara 18–30°C, oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*, DO), dimana tingkat DO yang ideal biasanya lebih dari 5 mg/L, kekeruhan air (*turbidity*), dan intensitas cahaya tanaman (menggunakan sensor LDR) (Sunardi *et al.*, 2021); (Naser *et al.*, 2019). Sistem IoT menggunakan mikrokontroler seperti Raspberry Pi, ATmega328 (atau Arduino Nano), dan NodeMcu untuk memproses data dan mengirimkannya ke basis data atau server web. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol perangkat keluaran (*actuators*) dari jarak jauh, termasuk pompa sirkulasi air, lampu stimulasi tanaman (*LED grow light*), kipas pendingin tanaman, dan pemberi pakan ikan otomatis (menggunakan *stepper motor*) (Sunardi *et al.*, 2021). Adanya pemantauan jarak jauh melalui aplikasi ponsel pintar (*smartphone app*) memungkinkan sistem akuaponik diterapkan di daerah pedesaan yang lebih murah dan diawasi dari jauh, yang secara signifikan dapat mengurangi biaya operasional (Naser *et al.*, 2019). Sistem ini juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi dan produktivitas (Lubna A Ibrahim *et al.*, 2023).

### Integrasi Probiotik (*Bacterial Component*)

Probiotik adalah mikroorganisme hidup yang bila diberikan dalam jumlah yang memadai akan memberikan manfaat kesehatan pada inang. Penggunaannya adalah cara yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi sistem akuaponik dan mempromosikan pertanian berkelanjutan (Rudoy *et al.*, 2025). Probiotik sangat penting untuk fungsi yang efisien dan berkelanjutan. Bakteri ini membantu memurnikan air dari zat beracun. Secara spesifik, probiotik meningkatkan rezim hidrokimia dalam sistem RAS dan mengurangi konsentrasi zat toksik seperti amonia (NH<sub>3</sub>) dan nitrit (NO<sub>2</sub>). Bakteri genus *Bacillus* dapat menyerap amonia melalui difusi. Selain itu, probiotik membantu mineralisasi bahan organik dan solubilisasi nutrisi mineral, seperti mengubah

fitat yang tidak larut menjadi fosfor yang tersedia bagi tanaman (Rudoy *et al.*, 2025). Probiotik membantu meningkatkan tingkat kelangsungan hidup organisme akuatik (seperti udang) hingga 95% dan meningkatkan laju pertumbuhan spesifik ikan, serta menurunkan *Feed Conversion Ratio* (FCR). Probiotik seperti genus *Bacillus* dikenal mampu meningkatkan ketahanan ikan terhadap penyakit (misalnya terhadap *Aeromonas hydrophila* dan *Vibrio harveyi*), seringkali melalui efek imunomodulator dan produksi zat antimikroba. Bakteri probiotik, terutama yang termasuk dalam *Plant Growth-Promoting Bacteria* (PGPB) seperti *Bacillus* dan *Lysobacter*, merangsang pertumbuhan tanaman. Mereka dapat meningkatkan hasil tanaman (misalnya, peningkatan berat basah pucuk selada hingga 23,8%). Mekanisme kerjanya meliputi produksi asam organik yang memfasilitasi konversi fosfor menjadi bentuk terlarut, serta produksi fitohormon (seperti sitokin dan auksin) yang merangsang pertumbuhan (Kasozi, Kaiser and Wilhelm, 2021).

### Penerapan *Complemented Aquaponics* (CAP)

Inovasi CAP (juga bagian dari sistem DAPS—*Decoupled Aquaponics System*) dikembangkan untuk mengatasi masalah kompromi kualitas air yang tak terhindarkan dalam sistem akuaponik satu loop. Dalam CAS, pH harus dikompromikan (biasanya sekitar 6,8–7,2) agar sesuai untuk ikan (optimal pH 7,0–8,0) dan bakteri nitrifikasi (optimal pH di atas 7,5), meskipun pH yang ideal untuk penyerapan nutrisi tanaman adalah sedikit asam (pH 5,5–6,0). Sistem DAPS/DRAPS memisahkan sirkuit air ikan dan tanaman, memungkinkan pH dan suhu di setiap bagian diatur secara terpisah, mengoptimalkan kondisi untuk masing-masing organisme (Delaide, 2017). Studi menunjukkan bahwa tanaman selada (*Lactuca sativa*) yang ditanam dalam larutan CAP—yaitu, air RAS yang dilengkapi dengan garam mineral kemurnian tinggi dan diatur pH-nya—menghasilkan pertumbuhan yang 39% lebih tinggi (berdasarkan peningkatan massa segar pucuk) dibandingkan dengan sistem hidroponik konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa CAP dapat melampaui potensi pertumbuhan hidroponik. Efek Pendorong Pertumbuhan Air RAS: Keunggulan CAP diduga berasal dari adanya faktor-faktor yang mendorong pertumbuhan dalam air RAS yang tidak ada dalam larutan hidroponik murni. Faktor-faktor ini mencakup *Dissolved Organic Matter* (DOM) dan/atau mikroorganisme promotor pertumbuhan (PGPR/PGPF) yang merangsang pertumbuhan akar dan meningkatkan penyerapan nutrisi tanaman. DAPS/CAP memungkinkan penambahan unsur hara yang seringkali kurang dalam air akuaponik (seperti Kalium (K), Fosfor (P), Besi (Fe), atau Molibdenum (Mo) untuk mencapai rasio nutrisi yang optimal dan meningkatkan hasil tanaman secara keseluruhan (Delaide, 2017).

Meskipun konsentrasi nutrisi dalam air akuaponik seringkali lebih rendah dibandingkan larutan hidroponik standar, hasil panen tanaman bisa setara atau bahkan lebih baik (Delaide, 2017). Penelitian oleh Delaide (2017) menunjukkan bahwa selada dapat ditanam dalam larutan akuaponik yang "diperkaya" (CAP) yang terdiri atas 100% air dari recirculating aquaculture system (RAS) yang dilengkapi dengan garam mineral dengan kemurnian tinggi untuk mencapai konsentrasi nutrisi yang sama seperti pada larutan kontrol hidroponik (HP), dengan hasil yang lebih tinggi dalam CAP dibandingkan HP. Air RAS diambil langsung dari bak penampungan ikan nila RAS yang sedang dipelihara dan diberi pakan 40% protein, 12% lipid, dan 3,7% serat kasar menghasilkan biomassa 39% lebih tinggi daripada selada dalam larutan hidroponik konvensional (HP). Hal ini mengindikasikan adanya senyawa organik terlarut (*Dissolved organic matter*) (DOM) atau mikroorganisme (*plant growth-promoting rhizobacteria*) (PGPR) dalam air RAS yang merangsang pertumbuhan akar dan tanaman selada. Ketersediaan unsur hara makro esensial seperti fosfor (P) dan kalium (K) sering menjadi faktor pembatas, karena cenderung mengendap dalam lumpur (*sludge*) daripada larut dalam air. Mineralisasi lumpur secara anaerobik (misalnya dengan reaktor UASB) menunjukkan potensi besar untuk mendaur ulang nutrisi ini (Delaide, 2017).

Data penelitian menunjukkan hasil perbandingan yang signifikan antara sistem Akuaponik yang Diperkaya (*Complemented Aquaponics*—CAP) dan sistem Hidroponik (HP) konvensional.

Tabel 1. Perbandingan CAP dengan Hidroponik pada Pertumbuhan Selada

Kelompok Perlakuan	Bobot Tunas Segar Rata-rata (g/tanaman) - Uji Coba 1	Bobot Tunas Segar Rata-rata (g/tanaman) - Uji Coba 2	Perbandingan Kenaikan (vs HP)
CAP (Akuaponik Diperkaya)	136,28 g	55,05 g	39% lebih tinggi
HP (Hidroponik Konvensional)	98,17 g	39,64 g	Dasar Perbandingan
AP (Akuaponik Biasa)	80,55 g	35,72 g	Setara secara statistik dengan HP

Tabel 1 menunjukkan bahwa larutan nutrisi dari sistem CAP, yaitu air *Recirculating Aquaculture System* (RAS) yang ditambahkan garam mineral kemurnian tinggi dan diatur pH-nya, menghasilkan pertumbuhan tanaman selada (*Lactuca sativa*) 39% lebih tinggi (berdasarkan peningkatan massa segar pucuk) dibandingkan dengan sistem HP konvensional. Keunggulan ini diduga berasal dari adanya *Dissolved Organic Matter* (DOM) atau mikroorganisme pendorong pertumbuhan (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*—PGPR) di dalam air RAS yang tidak ada dalam larutan hidroponik murni (Delaide, 2017).

Pakan ikan merupakan komponen biaya variabel terbesar dalam sistem akuakultur intensif, yang dapat mencapai 42,14% dari total biaya dalam model budidaya lele Afrika (Pasch and Palm, 2021). Namun demikian, efisiensi pakan (FCR) yang baik dapat dicapai, misalnya FCR 0.92 untuk lele Afrika pada sistem ekstensif dan FCR 1.25 pada sistem intensif. Penggunaan probiotik, terutama dari genus *Bacillus*, terbukti dapat meningkatkan tingkat kelangsungan hidup hewan air, memperbaiki kualitas air, dan meningkatkan laju pertumbuhan (Rudoy *et al.*, 2025). Selain itu, sistem akuaponik terbukti sangat efisien dalam penggunaan air, dengan tingkat daur ulang mencapai lebih dari 90% (Ibrahim *et al.*, 2023). Namun demikian, konsumsi energi bisa menjadi tinggi, terutama untuk pemanasan air (57% dari total konsumsi) dan pemompaan (18%) pada sistem skala kecil di iklim sedang (Delaide, 2017). Penggunaan energi terbarukan seperti sel surya menjadi solusi yang relevan. Aplikasi IoT memungkinkan pemantauan parameter kunci secara *real-time* dan kontrol jarak jauh, sehingga mempermudah pengelolaan dan mengurangi intervensi manusia (Naser *et al.*, 2019; Sunardi *et al.*, 2021). Sistem ini mampu mendeteksi kondisi kritis, seperti lonjakan kadar amonia yang berbahaya bagi ikan. Sebuah studi mencatat kadar amonia yang mencapai 0.5 mg/L dapat menyebabkan kematian ikan, namun setelah sistem hidroponik terintegrasi, kadar amonia stabil di level aman 0.02-0.04 mg/L (Naser *et al.*, 2019).

Selain itu, biaya investasi awal yang tinggi menjadi salah satu kendala utama (Ibrahim *et al.*, 2023). Profitabilitas sangat sensitif terhadap harga jual produk dan harga pakan (Pasch and Palm, 2021). Skala ekonomi sangat berpengaruh; menggandakan volume produksi dapat meningkatkan ROI secara signifikan. Selain itu, pengolahan produk (nilai tambah) seperti fillet atau produk asap dapat meningkatkan keuntungan secara drastis, dengan ROI dapat mencapai lebih dari 20% (Pasch and Palm, 2021). Studi pemodelan di Indonesia menunjukkan bahwa sistem air tawar dengan tomat lebih menguntungkan daripada sistem dengan padi atau sistem air payau dengan barramundi dan tomat, terutama karena harga lahan yang tinggi di perkotaan seperti Jakarta (Tarigan, Simon and Karel J, 2021). Beberapa hasil penelitian penerapan budidaya terpadu dengan sistem akuaponik, yang dirangkumkan dari berbagai sumber, disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Eksperimental dalam Sistem Akuaponik

Studi / Objek Penelitian	Jenis Perlakuan / Kelompok	Parameter yang Diukur	Hasil yang Didapatkan
Pertumbuhan Selada dengan Probiotik <i>Bacillus spp.</i>	1. Kontrol (tanpa probiotik)	Bobot basah panen akhir (rata-rata)	20,07 g
	2. Dengan Probiotik <i>Bacillus spp.</i>	Bobot basah panen akhir (rata-rata)	24,84 g (peningkatan 23,8%)
Pertumbuhan Selada dalam Larutan Nutrisi Berbeda (Uji coba 1)	1. Larutan Hidroponik (HP - Kontrol)	Bobot tunas segar (rata-rata per tanaman)	98,17 g
	2. Larutan Akuaponik (AP)	Bobot tunas segar (rata-rata per tanaman)	80,55 g (secara statistik tidak berbeda signifikan dari HP)
	3. Larutan Akuaponik yang Diperkaya (CAP)	Bobot tunas segar (rata-rata per tanaman)	136,28 g (peningkatan 39% dari HP)
Pertumbuhan Selada & Selasih Berdasarkan Tipe Media Tanam	1. <i>Ebb and Flow</i> (EAF)	Bobot tunas segar (perbandingan)	Menjadi dasar perbandingan
	2. <i>Deep Water Culture</i> (DWC)	Bobot tunas segar (perbandingan)	10x lebih tinggi untuk selada, dan 3-5x lebih tinggi untuk selasih, dibandingkan EAF
Pertumbuhan Selasih ( <i>Basil</i> ) dengan Substrat & Sumber Air Berbeda	1. Kontrol (Pupuk komersial + Substrat S2)	Lebar daun (rata-rata)	7,7 cm
	2. Substrat Standar (E) + Air	Lebar daun (rata-rata)	7,3 cm

Studi / Objek Penelitian	Jenis Perlakuan / Kelompok	Parameter yang Diukur	Hasil yang Didapatkan
	Akuakultur Intensif (IAU)		
Kinerja Stroberi Berdasarkan Waktu Tanam	3. Substrat HFS + Air	Lebar daun (rata-rata)	7,5 cm (lebih tinggi dari substrat standar)
	Akuakultur Intensif (IAU)		
	1. Tanam 15 Januari	Jumlah buah per tanaman (rata-rata)	8,40 buah
	2. Tanam 15 Februari	Jumlah buah per tanaman (rata-rata)	20,0 buah (tertinggi)
	3. Tanam 15 Maret	Jumlah buah per tanaman (rata-rata)	7,40 buah
Pengaruh Sistem Akuaponik terhadap Kadar Amonia	1. Akuakultur Saja (tanpa komponen hidroponik)	Kadar Amonia (NH3)	Meningkat hingga level berbahaya 0,5 mg/L, menyebabkan kematian ikan
	2. Akuakultur + Hidroponik (Sistem Akuaponik)	Kadar Amonia (NH3)	Stabil pada rentang aman 0,02 - 0,04 mg/L
Analisis Ekonomi Pernakan Lele Dumbo (300 m <sup>3</sup> PV)	1. Model Awal (100% ikan utuh dijual ke grosir)	Laba Tahunan	€0 (hanya menutupi biaya)
	2. Opsi 1 (80% diolah menjadi fillet)	Laba Tahunan	€ 28.53
	3. Opsi 2 (50% fillet, 30% fillet asap)	Laba Tahunan	€ 212.20
	4. Opsi 3 (ditambah toko di lokasi perternakan)	Laba Tahunan	€ 297.20

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa pengaruh probiotik sangat positif: penambahan probiotik, khususnya dari genus *Bacillus*, secara konsisten menunjukkan peningkatan pertumbuhan biomassa tanaman seperti selada, dengan peningkatan bobot mencapai 15,3% hingga 23,8%. Ini membuktikan bahwa intervensi biologis dapat secara langsung meningkatkan hasil panen. Air Akuaponik mengandung faktor pemicu pertumbuhan: salah satu temuan paling signifikan adalah bahwa larutan akuaponik yang diperkaya (CAP) menghasilkan pertumbuhan selada 39% lebih tinggi dibandingkan dengan hidroponik standar (HP). Meskipun larutan akuaponik biasa (AP) memiliki konsentrasi nutrisi yang lebih rendah, hasil panennya setara dengan hidroponik. Hal ini mengindikasikan bahwa air dari sistem akuakultur mengandung senyawa organik terlarut dan/atau mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman, yang tidak ada dalam larutan mineral murni hidroponik.

Desain sistem dan faktor lingkungan juga sangat berpengaruh terhadap tanaman karena pemilihan tipe media tanam juga sangat krusial. Sistem *Deep Water Culture* (DWC) terbukti jauh lebih produktif untuk selada dan selasih dibandingkan dengan *Ebb and Flow* (EAF). Waktu tanam juga menjadi faktor penentu. Stroberi yang ditanam pada 15 Februari menghasilkan buah jauh lebih banyak dibandingkan penanaman pada Januari atau Maret. Hal ini disebabkan oleh suhu zona akar yang optimal (9,8-13 °C) pada periode tersebut, yang mendukung biomassa dan produksi buah yang lebih tinggi (Ullah *et al.*, 2022). Fungsi vital komponen hidroponik menjelaskan bahwa data perbandingan kadar amonia secara jelas menunjukkan peran fundamental komponen tanaman dalam sistem akuaponik. Tanpa tanaman, amonia dari limbah ikan akan terakumulasi hingga level toksik (0,5 mg/L), tetapi dengan adanya tanaman, kadar amonia tetap stabil dan aman (0,02-0,04 mg/L). Diversifikasi produk meningkatkan profitabilitas secara drastis di mana analisis ekonomi menunjukkan bahwa menjual ikan dalam bentuk mentah (utuh) hampir tidak menghasilkan keuntungan (€0), sedangkan dengan mengolah produk menjadi fillet, fillet asap, dan menjualnya langsung melalui toko di lokasi, laba tahunan dapat meningkat secara eksponensial hingga €297.204 (Pasch and Palm, 2021). Hal ini mengarah pada pentingnya retensi rantai nilai dalam perusahaan untuk mencapai kelayakan ekonomi.

Berdasarkan sumber yang tersedia, tidak terdapat data ekonomi spesifik seperti harga lahan, upah Minimum Regional (UMR), atau harga komoditas di Indonesia. Oleh karena itu, simulasi ekonomi untuk Mataram ini akan didasarkan pada Model Dinamis Aquaponik IndonesiaAP yang dievaluasi untuk konteks Jakarta, namun disesuaikan dengan asumsi sensitivitas harga yang relevan untuk Mataram sebagai kota regional di Indonesia. Asumsi utama untuk Mataram adalah bahwa biaya lahan dan tenaga kerja, yang merupakan parameter paling sensitif terhadap profitabilitas, jauh lebih rendah dibandingkan di Jakarta (Tarigan, Simon and Karel J, 2021). Model ini terdiri dari:

1. Sistem Akuakultur Daur Ulang (RAS): Unit produksi ikan (Nila/Barramundi) dengan total volume  $12,5 \text{ m}^3$  (4 tangki) yang beroperasi secara bertahap (*staggered production*).
2. Sistem Hidroponik (HPS): Luas lahan budidaya  $1000 \text{ m}^2$  (area nominal), dengan tanaman tomat atau padi (yang membutuhkan air lebih banyak).
3. Unit Pencerna Anaerob (ADU): Mengolah limbah padat (sludge) dari RAS menjadi bio-pupuk dan energi (metana).
4. Sistem Budidaya *Duckweed* (DCS): Opsi untuk mensubstitusi pakan komersial ikan dan menangkap kelebihan nutrisi N dan P dari HPS, tetapi secara nominal tidak direkomendasikan di Jakarta karena biaya lahan yang tinggi.

Evaluasi kinerja ekonomi dan keberlanjutan didasarkan pada: NPV, mengukur profitabilitas jangka panjang (dihitung selama 8 tahun dengan tingkat pengembalian 5%), waktu titik impas, mengukur waktu yang diperlukan agar arus kas bersih menjadi positif, efisiensi penggunaan nutrisi, mengukur total nutrisi yang didaur ulang, bukan yang terbuang, efisiensi penggunaan air. Model IndonesiaAP di Jakarta menunjukkan bahwa investasi awal (NPV) sangat sensitif terhadap harga lahan dan biaya tenaga kerja. Sistem FW-Rice (Nila & Padi), yang relevan untuk ketahanan pangan Indonesia, terbukti *tidak layak* (NPV negatif) di Jakarta karena tingginya biaya-biaya tersebut (Tarigan, Simon and Karel J, 2021). Untuk mensimulasikan Mataram, diasumsikan terjadi penurunan biaya secara signifikan dibandingkan dengan nominal Jakarta.

Tabel 3. Data Simulasi di Kota Mataram

Parameter Biaya	Nilai Nominal Jakarta (EUR)	Asumsi Mataram (Contoh Reduksi)	Implikasi di Mataram
Biaya Lahan	2,67 EUR/ $\text{m}^2$ /tahun	10% dari Nominal Jakarta	Mengubah NPV menjadi positif, terutama untuk sistem yang membutuhkan area besar seperti budidaya padi.
Upah Minimum	254,2 EUR/bulan	50% dari Nominal Jakarta	Menurunkan biaya variabel operasional.

Skenario yang dapat dicobakan untuk kota Mataram diantaranya sebagai berikut: a) simulasi menggunakan nila dan tomat, yang sudah terbukti memberikan NPV positif karena tomat memiliki toleransi nutrisi N dan P yang lebih lebar dan menghasilkan nilai jual yang lebih tinggi. Di Kota Mataram, dengan biaya operasional yang lebih rendah, profitabilitas sistem nila dan tomat akan semakin tinggi. Sistem ini mencapai Water Use Efficiency (WUE) dan Nutrient Use Efficiency (NUE) lebih dari 95% karena tomat memiliki batas konsentrasi P yang lebih tinggi, sehingga mengurangi kebutuhan dilusi air dibandingkan padi. Dapat diketahui peningkatan kepadatan ikan (dari  $40 \text{ kg/m}^3$  menjadi  $80 \text{ kg/m}^3$ ) dan menurunkan kandungan P pakan (misalnya, menjadi 0,6%) untuk memaksimalkan NUE dan WUE hingga mendekati 94–96%, yang merupakan strategi paling menguntungkan. b) Simulasi menggunakan barramundi dan tomat. Jika di Mataram memanfaatkan lokasi air payau (seperti daerah pesisir), sistem barramundi dan tomat juga memberikan NPV positif. Simulasi ini memiliki NUE dan WUE yang mirip dengan nila dan tomat (sekitar >95%). Kelayakan ekonomi sistem barramundi dan tomat dapat melampaui nila dan tomat jika harga jual tomat dari air payau ditingkatkan sebesar 20% (berpotensi karena rasa yang lebih baik dari salinitas yang lebih tinggi). Perluasan area budidaya tanaman tomat sebesar 35% dapat membuat NPV sistem barramundi dan tomat sebanding dengan sistem nila dan tomat nominal. c) Simulasi menggunakan nila dan padi. Padi merupakan komoditas penting di Indonesia. Dengan menerapkan asumsi biaya di kota Mataram (Lahan 10%, Upah 50%), sistem ini dapat diuji ulang. Optimasi output (diperlukan): Sistem nila dan padi memerlukan optimasi intensif untuk mencapai NPV positif, termasuk memperluas area budidaya tanaman menjadi setidaknya  $1300 \text{ m}^2$ , menggandakan kepadatan ikan menjadi  $80 \text{ kg/m}^3$ , dan menggunakan pakan P rendah (0,6%). Dengan kombinasi optimasi intensif dan pengurangan biaya (Lahan 10%, Upah 50%), sistem nila dan padi yang sebelumnya merugi di Mataram dapat mencapai NPV positif (sekitar €2419), menjadikannya layak secara ekonomi di Kota Mataram.

## KESIMPULAN

Akuaponik merupakan sistem produksi pangan berkelanjutan dengan kemampuan mengurangi konsumsi air hingga lebih dari 90% dibandingkan pertanian konvensional. Secara spesifik, selada yang ditanam dalam larutan akuaponik yang diperkaya (CAP) menunjukkan biomassa 39% lebih tinggi dibandingkan hidroponik, yang mengindikasikan adanya senyawa organik atau mikroorganisme perangsang pertumbuhan (PGPR) di dalam air limbah akuakultur. Integrasi Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh secara real-time, yang secara signifikan mengurangi risiko kegagalan sistem. Profitabilitas akuaponik sangat sensitif terhadap biaya pakan (mencapai 42,1% dari total biaya) dan harga jual produk. Jalan menuju keberlanjutan

ekonomi bergantung pada tiga strategi utama: peningkatan skala produksi untuk mencapai skala ekonomi, diversifikasi dan pengolahan produk pascapanen (seperti fillet atau produk ikan asap yang dapat meningkatkan ROI hingga di atas 20%), dan pemasaran langsung untuk memperoleh harga jual yang lebih tinggi. Tantangan ilmiah utama yang tersisa adalah menciptakan siklus nutrisi yang sepenuhnya tertutup. Fosfor (P) dan Kalium (K) cenderung mengendap dalam lumpur padat, sehingga diperlukan pengembangan teknologi mineralisasi yang efisien untuk mendaur ulang unsur hara ini.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Ir. Wayan Wangiyana atas bimbingan dan masukan berharganya selama proses penulisan review jurnal ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada para penulis jurnal yang karyanya telah menjadi fondasi dari tulisan ini. Akhir kata, semua kekurangan dan kesalahan yang mungkin ada dalam review ini sepenuhnya merupakan tanggung jawab penulis.

## DAFTAR PUSTAKA

- AM, S. and others (2022) 'Growth performance and hematological, biochemical, and histological characters of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, L.) cultivated in an aquaponic system with green onion: The first study about the aquaponic system in Sohag, Egypt', *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 26(2), pp. 119–131.
- Baganz, G. F. M. et al. (2022) 'City or hinterland--site potentials for upscaled aquaponics in a Berlin case study', *npj Urban Sustainability*, 2(1), p. 29. doi: ; <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00072-y>.
- Delaide, B. (2017) *A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability*. Universite de Liege (Belgium).
- Ibrahim, L A et al. (2023) 'A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. Water 2023, 15, 4310'.
- Ibrahim, Lubna A et al. (2023) 'Aquaponics: a sustainable path to food sovereignty and enhanced water use efficiency', *Water*, 15(24), p. 4310.
- Joly, A., Junge, R. and Bardocz, T. (2015) 'Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions', *Ecocycles*, 1(2), pp. 3–5.
- Kasozi, N., Kaiser, H. and Wilhelmi, B. (2021) 'Effect of *Bacillus* spp. on lettuce growth and root associated bacterial community in a small-scale aquaponics system', *Agronomy*, 11(5), p. 947.
- Knaus, U. et al. (2024) 'Aquaponic growth of basil (*Ocimum basilicum*) with African catfish (*Clarias gariepinus*) in standard substrate combined with a Humicacid Fiber-Substrate (HFS)', *Scientific Reports*, 14(1), p. 17725.
- Mchunu, N., Lagerwall, G. and Senzanje, A. (2018) 'Aquaponics in South Africa: Results of a national survey', *Aquaculture Reports*, 12, pp. 12–19.
- Naser, B. A. A.-Z. et al. (2019) 'Design and construction of smart IoT-based aquaponics powered by PV cells', *International Journal of Energy and Environment*, 10(3), pp. 127–134.
- Neforawati, I. et al. (2016) 'Penggunaan Notifikasi Berbasis Android untuk Memantau Perawatan pada Sistem Otomasi Akuaponik Menggunakan Mikrokontroller ATmega 2560', *Jurnal Multinetics*, 2(2), p. 24.
- Pasch, J. and Palm, H. W. (2021) 'Economic analysis and improvement opportunities of African catfish (*Clarias gariepinus*) aquaculture in northern Germany', *Sustainability*, 13(24), p. 13569.
- Rudoy, D. et al. (2025) 'Prospects for the Application of Probiotics to Increase the Efficiency of Integrated Cultivation of Aquatic Animals and Plants in Aquaponic Systems', *Fishes*, 10(6), p. 251.
- Sunardi, A. et al. (2021) 'IOT application on aquaponics system energy optimization', in *Journal of Physics: Conference Series*, p. 12046.
- Sundari, R. S. et al. (2021) 'Enhancing food security throughout Aquaponics in urban farming development strategy', in *Journal of physics: conference series*, p. 12209.
- Tarigan, N. B., Simon, G. and Karel J, K. (2021) 'Explorative study of aquaponics systems in Indonesia', *Sustainability*, 13(22), p. 12685.
- Ullah, S. et al. (2022) 'Performance of strawberry in a closed loop aquaponics system.', *Pakistan Journal of Weed Science Research*, 28(3).