

IoT-Based Precision Aquaculture: A Bibliometric Analysis of Research Trends from 2020 to 2026

Jefri Anjaini^{1,3,4*}, Radhi Fadhilah^{1,5}, Rahmat Hidayat^{1,6}, Farkhana Laily^{1,7}, Susilo Budi Priyono², Frentina Murti Sujadi^{3,4}, Rangga Idris Affandi⁸

¹Program Doktorat Ilmu Perikanan dan Kelautan Tropis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Jawa Tengah;

²Program Studi Akuakultur, Departemen Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Jawa Tengah;

³Program Studi Akuakultur Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Jawa Tengah;

⁴Aquadiv Research Group, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto;

⁵Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Teuku Umar Meulaboh, Aceh;

⁶Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jakarta Pusat;

⁷Program Studi Budidaya Perairan, Akademi Perikanan, Yogyakarta, Jawa Tengah;

⁸Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Mataram, Nusa Tenggara Barat;

Article History

Received : June 26th, 2026

Revised : July 20th, 2026

Accepted : July 28th, 2026

*Corresponding Author: **Jefri**

Anjaini, Program Doktorat Ilmu Perikanan dan Kelautan Tropis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta; Program Studi Akuakultur Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman;

Aquadiv Research Group, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto;

Email:

jefri.anjaini@unsoed.ac.id

Abstract: The adoption of the Internet of Things (IoT) has transformed aquaculture from manual monitoring into data-driven precision management. This study maps the intellectual structure, publication trends, key contributors, and emerging research directions in IoT-based precision aquaculture, spanning sensor-based monitoring to decision support systems. A bibliometric analysis was conducted on 303 Scopus-indexed documents retrieved using a TITLE-ABS-KEY query combining “Internet of Things” and related terms with “aquaculture.” Document screening followed the PRISMA 2020 protocol. Performance analysis and science mapping were performed using VOSviewer through citation-network and keyword co-occurrence analyses. Because data retrieval occurred during the partial publication year 2026, the compound annual growth rate (CAGR = 19.5%) was calculated only for the complete-year period 2020–2025, while 2026 publications were included in citation and mapping analyses. The dataset accumulated 4,791 citations (mean = 15.81 citations per document; h-index = 38). *Sensors* was the most productive journal, whereas Indonesia and India were the leading publishing countries. Keyword co-occurrence identified five major research themes: sensor-based water-parameter monitoring, environmental quality monitoring, IoT-machine learning integration, smart fish farming, and AI-based decision support. These findings indicate a shift from environmental monitoring toward intelligent, predictive, and decision-oriented aquaculture management.

Keywords: Bibliometric Analysis; Decision Support System; Internet of Things; Precision Aquaculture; Vosviewer; Water Quality Monitoring.

Pendahuluan

Akuakultur telah menjelma menjadi salah satu pilar utama ketahanan pangan global. Laporan *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024* mencatat bahwa produksi perikanan dan akuakultur dunia mencapai rekor 223,2 juta ton dan untuk

pertama kalinya produksi akuakultur hewan akuatik melampaui produksi perikanan tangkap (FAO, 2024). Pencapaian ini sejalan dengan agenda *Blue Transformation* yang menargetkan intensifikasi dan ekspansi akuakultur secara berkelanjutan guna memenuhi kebutuhan protein populasi dunia yang terus bertambah. Namun, peningkatan

produksi yang bertumpu pada intensifikasi menuntut pengendalian lingkungan budi daya yang semakin ketat, presisi, dan responsif terhadap dinamika parameter air secara waktu nyata. Tuntutan ini tidak dapat lagi dipenuhi secara memadai oleh metode pengelolaan tradisional yang bertumpu pada intervensi manual dan pengamatan periodik.

Praktik akuakultur konvensional sangat bergantung pada pengukuran manual dan pengalaman empiris pembudidaya dalam mengelola parameter kualitas air seperti oksigen terlarut, suhu, pH, salinitas, dan amonia. Pendekatan ini rentan terhadap keterlambatan deteksi anomali, kesalahan pengukuran, serta keterbatasan cakupan spasial dan temporal. Padahal, fluktuasi parameter air terutama penurunan oksigen terlarut yang memicu kondisi hipoksia yang dapat menyebabkan kematian massal organisme budidaya dalam waktu singkat dan kerugian ekonomi yang signifikan (Huan *et al.*, 2020; Arepalli & Naik, 2024). Keterbatasan inilah yang mendorong transisi paradigma menuju akuakultur presisi (*precision aquaculture*), yaitu pendekatan budi daya yang memanfaatkan teknologi penginderaan, konektivitas, dan analitik data untuk mengoptimalkan keputusan pengelolaan secara berbasis bukti (O'Donncha *et al.*, 2021). Paradigma ini menggeser fokus pengelolaan dari reaktif menjadi prediktif dan preventif.

Internet of Things (IoT) menjadi teknologi pemungkin (*enabling technology*) utama dalam transformasi tersebut. Arsitektur IoT memungkinkan integrasi sensor lingkungan, modul konektivitas berdaya rendah seperti LoRaWAN dan *Narrowband-IoT* (NB-IoT), platform komputasi awan, hingga antarmuka aplikasi yang menyajikan informasi kepada pembudidaya secara waktu nyata (Bates *et al.*, 2021; Jamroen *et al.*, 2023). Secara konseptual, sistem IoT akuakultur tersusun dalam beberapa lapisan, yaitu lapisan persepsi yang terdiri atas sensor dan aktuator, lapisan jaringan yang mengelola transmisi data, lapisan pemrosesan yang menjalankan analitik, serta lapisan aplikasi yang menyajikan informasi dan keputusan. Lebih jauh, konvergensi IoT dengan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence of Things/AIoT*), pembelajaran mesin, dan pembelajaran mendalam telah memperluas kapabilitas sistem dari sekadar pemantauan pasif menjadi

prediksi, peringatan dini, dan otomatisasi aktuator (Chiu *et al.*, 2022; Ubina *et al.*, 2023). Dengan demikian, lanskap riset bergerak di sepanjang kontinum mulai dari lapisan sensor (*sensors*) hingga sistem pendukung keputusan (*decision support*) yang cerdas dan otonom.

Seiring meningkatnya minat akademik, jumlah publikasi ilmiah mengenai IoT dalam akuakultur tumbuh secara eksponensial dalam lima tahun terakhir. Pertumbuhan ini menghasilkan korpus pengetahuan yang luas, terfragmentasi, dan tersebar pada beragam disiplin mulai dari teknik elektro, ilmu komputer, hingga ilmu perikanan dan kelautan. Kondisi ini menyulitkan peneliti, khususnya pada jenjang doktoral, untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai struktur intelektual bidang, aktor-aktor utama, pola kolaborasi, serta arah perkembangan tematiknya. Tinjauan naratif tradisional cenderung subjektif, terbatas cakupannya, dan tidak mampu menangani volume literatur yang besar secara objektif dan dapat direplikasi (Donthu *et al.*, 2021).

Analisis bibliometrik hadir sebagai metode kuantitatif yang sistematis untuk mengkaji performa dan struktur intelektual suatu bidang ilmu berdasarkan data publikasi dan sitasi (Donthu *et al.*, 2021; Aria & Cuccurullo, 2017). Melalui analisis kinerja dan pemetaan sains, metode ini mampu mengidentifikasi tren produktivitas, sumber dan penulis paling berpengaruh, pola kolaborasi, serta klaster tematik yang membentuk fondasi konseptual sebuah domain. Beberapa tinjauan mengenai IoT dalam akuakultur telah dipublikasikan sebelumnya (Manan *et al.*, 2023; Rojas *et al.*, 2025), namun kajian-kajian tersebut memiliki keterbatasan yang berbeda dari pendekatan penelitian ini dalam empat aspek. *Pertama*, secara metodologis kajian terdahulu umumnya bersifat naratif atau sistematis-kualitatif dengan sintesis selektif terhadap sejumlah studi, sedangkan penelitian ini menerapkan analisis bibliometrik kuantitatif atas keseluruhan korpus (303 dokumen) yang ditelusuri secara terprotokol dan reproduktibel. *Kedua*, dari sisi cakupan, tinjauan sebelumnya cenderung berfokus pada subtopik teknis tertentu (misalnya jenis sensor atau algoritma), sementara penelitian ini memetakan keseluruhan struktur intelektual bidang melalui analisis co-occurrence kata kunci dan jejaring

sitasi. *Ketiga*, secara analitis, penelitian ini tidak berhenti pada deskripsi tema, melainkan memosisikan temuannya sebagai satu kontinum "from sensors to decision support" yang menggambarkan pematangan bidang dari pemantauan lingkungan menuju sistem pendukung keputusan cerdas. *Keempat*, penelitian ini menyoroti konteks negara tropis sebagai sentra produksi akuakultur global dalam rentang waktu mutakhir (2020–2026)—sebuah lensa geografis yang belum ditonjolkan pada tinjauan terdahulu. Celah inilah yang berupaya diisi oleh penelitian ini.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan tren produktivitas publikasi dan dampak sitasi riset akuakultur presisi berbasis IoT pada periode 2020-2026; (2) mengidentifikasi sumber, penulis, dan negara paling berpengaruh; (3) menganalisis struktur jaringan sitasi dan ko-okurensi kata kunci untuk mengungkap klaster tematik serta fondasi intelektual bidang; serta (4) merumuskan celah riset dan arah pengembangan ke depan. Dengan menjawab tujuan-tujuan tersebut, artikel ini diharapkan menjadi peta jalan ilmiah yang bermanfaat bagi pengembangan teknologi akuakultur presisi yang berkelanjutan, khususnya dalam konteks negara-negara tropis penghasil produk akuatik utama dunia, sekaligus menjadi rujukan bagi peneliti doktoral dalam memosisikan kontribusi riset secara strategis.

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis bibliometrik dengan desain kuantitatif-deskriptif. Analisis bibliometrik dipilih karena kemampuannya menangani volume data ilmiah yang besar secara objektif, sistematis, dan dapat direplikasi, sehingga sesuai untuk memetakan struktur intelektual suatu bidang ilmu yang berkembang pesat (Donthu *et al.*, 2021). Berbeda dengan tinjauan pustaka naratif yang rentan terhadap bias seleksi dan interpretasi subjektif, analisis bibliometrik menyandarkan kesimpulannya pada data metadata publikasi yang terukur. Kerangka kerja yang diadopsi mengikuti dua teknik utama yang direkomendasikan dalam literatur bibliometrik, yaitu analisis kinerja (*performance analysis*) untuk mengevaluasi kontribusi konstituen riset seperti penulis, sumber, dan negara; dan

pemetaan sains (*science mapping*) untuk mengungkap hubungan struktural serta dinamika tematik antarunsur literatur (Aria & Cuccurullo, 2017; Donthu *et al.*, 2021).

Berikut paragraf lengkap hasil revisi, menggabungkan teks asli Anda dengan pembahasan bias yang diminta reviewer dan kalimat penutup sesuai keputusan Anda (dibatasi ke *article* dan *review*).

Sumber data tunggal yang digunakan dalam penelitian ini adalah pangkalan data Scopus. Scopus dipilih karena cakupan jurnal terindeks yang luas, kualitas metadata yang terstruktur, kontrol kualitas yang ketat melalui sistem peninjauan Content Selection and Advisory Board, serta kelengkapan informasi sitasi yang dibutuhkan untuk analisis pemetaan sains. Dibandingkan Google Scholar yang cakupannya luas tetapi kurang terkurasi, dan Web of Science yang cakupannya pada bidang rekayasa tertentu lebih sempit, Scopus menawarkan keseimbangan antara keluasan dan kualitas. Penggunaan satu pangkalan data juga menghindari masalah duplikasi rekaman dan inkonsistensi format metadata yang lazim muncul ketika menggabungkan beberapa basis data, sehingga menjaga konsistensi unit analisis.

Meskipun demikian, ketergantungan pada Scopus sebagai sumber tunggal memiliki implikasi yang perlu diakui secara transparan. Bidang IoT bersifat sangat berorientasi rekayasa, dan sebagian besar diseminasi awalnya berlangsung melalui prosiding konferensi—khususnya yang diterbitkan IEEE. Cakupan Scopus terhadap prosiding rekayasa, meskipun substansial, tidak selengkap basis data khusus seperti IEEE Xplore, dan pengindeksannya dapat mengalami jeda waktu. Bias ini diperkuat oleh keputusan penelitian ini untuk membatasi tipe dokumen pada artikel jurnal dan tinjauan—sebuah pilihan yang diambil secara sadar guna menjaga kualitas metadata, kelengkapan sitasi, dan reproduktibilitas analisis pemetaan sains, mengingat dokumen prosiding kerap memiliki metadata sitasi dan kata kunci yang kurang konsisten. Konsekuensinya, korpus yang dianalisis merepresentasikan literatur berbasis jurnal secara lebih memadai dibandingkan literatur berbasis konferensi, sehingga sebagian karya rekayasa mutakhir yang masih berupa prosiding konferensi berada di luar cakupan. Implikasinya bersifat spesifik: peringkat produktivitas sumber, distribusi geografis, maupun kematangan klaster tematik dapat sedikit

condong ke arah komunitas riset yang lebih berorientasi jurnal. Keterbatasan ini dinyatakan secara eksplisit pada bagian keterbatasan penelitian. Dengan demikian, pilihan Scopus tunggal dengan penyaringan artikel dan tinjauan dipandang sebagai kompromi yang mengutamakan konsistensi serta kualitas unit analisis, dengan konsekuensi berupa keterwakilan literatur berbasis konferensi yang tidak menyeluruh.

Penelusuran data dilakukan pada medan judul, abstrak, dan kata kunci (field code TITLE-ABS-KEY) menggunakan kueri pencagirikan berikut: TITLE-ABS-KEY(("Internet of Things" OR "Internet-of-Things" OR IoT OR "IoT-based") AND (aquacultur* OR "aqua farm*" OR aquafarm* OR "fish farm*" OR "fish culture" OR maricultur* OR "recirculating aquaculture system*" OR RAS)). Tanda kurung digunakan secara eksplisit untuk mengelompokkan dua blok sinonim dan menetapkan urutan evaluasi operator Boolean, sehingga irisan antara domain teknologi IoT dan domain akuakultur terjamin serta kueri dapat direplikasi secara persis. Operator OR memperluas jangkauan terhadap sinonim di dalam masing-masing blok, sedangkan operator AND menautkan kedua blok inti. Karakter pemenggalan (truncation) berupa tanda bintang digunakan untuk menjaring seluruh variasi morfologis istilah kunci, misalnya "aquacultur*" yang menangkap "aquaculture" dan "aquacultural". Strategi ini bertujuan menjaga cakupan literatur tetap komprehensif tanpa kehilangan relevansi terhadap dua domain inti, yakni teknologi IoT dan akuakultur..

Proses penyaringan dan seleksi dokumen mengikuti alur *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 yang terdiri atas empat tahap (Page et al., 2021). Pada tahap identifikasi, kueri menghasilkan sejumlah rekaman awal dari Scopus. Tahap penyaringan (*screening*) dilakukan dengan membatasi rentang waktu publikasi 2020-2026 untuk menangkap perkembangan mutakhir bidang sekaligus mencakup karya-karya perintis yang menjadi fondasi. Pada tahap kelayakan (*eligibility*), jenis dokumen dibatasi pada artikel jurnal (*article*) guna menjamin kualitas penelitian yang telah melalui peninjauan sejawat penuh, sekaligus menjaga homogenitas unit analisis; dokumen berbahasa selain Inggris dan rekaman dengan metadata tidak lengkap seperti ketiadaan informasi penulis atau sumber dikeluarkan dari

analisis. Tahap akhir menghasilkan 303 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan dianalisis dalam penelitian ini (*included*). Penetapan kriteria inklusi dan eksklusi yang eksplisit ini menjamin transparansi dan keterulangan prosedur seleksi.

Seluruh metadata dokumen yang lolos seleksi diekspor dari Scopus dalam format *Comma-Separated Values* (CSV) lengkap, mencakup nama penulis, afiliasi, judul, tahun, sumber publikasi, jumlah sitasi, *Digital Object Identifier* (DOI), kata kunci penulis dan kata kunci terindeks, abstrak, serta daftar referensi. Tahap prapemrosesan data dilakukan untuk memastikan kualitas analisis, meliputi penyeragaman penulisan nama penulis dan afiliasi yang sering ditulis dalam variasi berbeda, penanganan rekaman dengan medan kosong, serta pemeriksaan duplikasi berdasarkan DOI dan judul. Pembersihan data terhadap istilah sinonim dan singkatan pada kata kunci dilakukan melalui pembuatan thesaurus untuk menggabungkan varian seperti "*Internet of Things*", "*Internet of Things (iot)*", dan "*iot*" agar tidak terhitung sebagai entitas yang berbeda dalam analisis ko-okurensi. Tahap pembersihan ini krusial karena kualitas hasil pemetaan sains sangat bergantung pada konsistensi data masukan.

Analisis dilakukan dengan dua perangkat lunak yang saling melengkapi. Analisis kinerja deskriptif mencakup distribusi publikasi per tahun, total dan rata-rata sitasi, h-indeks korpus, sumber paling produktif, penulis paling produktif, serta distribusi geografis berdasarkan afiliasi dihitung menggunakan pustaka pemrograman analisis data berbasis bahasa Python. Adapun pemetaan sains dilakukan menggunakan VOSviewer versi terkini, sebuah perangkat lunak pemetaan bibliometrik yang dikembangkan untuk mengonstruksi dan memvisualisasikan jaringan bibliometrik berdasarkan kedekatan antarunsur (van Eck & Waltman, 2010). VOSviewer dipilih karena keunggulannya dalam menangani jaringan berskala besar dan menghasilkan visualisasi berbasis klaster yang intuitif melalui teknik normalisasi association strength serta algoritma penataan tata letak berbasis jarak (*distance-based layout*).

Dua jenis analisis jaringan utama dijalankan dalam penelitian ini. Pertama, analisis jaringan sitasi (*citation network analysis*) pada tingkat dokumen, yang menggambarkan

keterhubungan antarpublikasi berdasarkan rujukan langsung dan mengidentifikasi karya-karya yang menjadi fondasi intelektual bidang. Kedua, analisis ko-okurensi kata kunci (*co-occurrence analysis*) berdasarkan kata kunci penulis, yang memetakan kemunculan bersama istilah-istilah kunci dalam korpus untuk mengungkap struktur tematik dan keterkaitan konseptual antarsubtopik. Dalam kedua analisis tersebut, metode penghitungan penuh (*full counting*) diterapkan. Dalam visualisasi jaringan, ukuran simpul (*node*) merepresentasikan bobot kemunculan atau jumlah sitasi, ketebalan garis penghubung menunjukkan kekuatan keterkaitan (*link strength*), jarak antarsimpul menggambarkan kedekatan relasional, sedangkan warna menandai keanggotaan klaster yang dihasilkan oleh algoritma pengklasteran VOSviewer.

Sejumlah indikator bibliometrik dimaknai sebagai berikut. Produktivitas diukur melalui jumlah dokumen per tahun, sumber, penulis, dan negara. Dampak ilmiah diukur melalui total sitasi, rata-rata sitasi per dokumen, dan h-indeks, yaitu nilai h ketika terdapat h dokumen yang masing-masing disitasi paling sedikit h kali. Laju pertumbuhan tahunan majemuk (*compound annual growth rate/CAGR*) dihitung untuk menggambarkan kecepatan perkembangan publikasi pada periode 2020-2025, dengan tahun 2026 dikecualikan karena bersifat parsial. Struktur tematik diinterpretasikan dari klaster ko-okurensi kata kunci, sedangkan fondasi intelektual diidentifikasi dari dokumen dengan sitasi tertinggi dan posisinya dalam jaringan sitasi.

Untuk menjamin keterandalan interpretasi, hasil dari kedua perangkat lunak ditriangulasikan secara sistematis. Temuan kuantitatif dari analisis kinerja seperti peringkat penulis, sumber, dan negara diperiksa silang dengan posisi dan sentralitas unsur yang bersangkutan dalam jaringan pemetaan sains, sehingga kesimpulan tidak bertumpu pada satu jenis indikator semata. Penafsiran klaster tematik dilakukan dengan menelaah kembali kata kunci anggota tiap klaster beserta artikel-artikel representatifnya, lalu menamai klaster berdasarkan makna substantif yang muncul, bukan sekadar label otomatis. Pendekatan ini sejalan dengan praktik terbaik analisis bibliometrik yang menekankan bahwa visualisasi jaringan harus dilengkapi dengan interpretasi kontekstual berbasis pengetahuan domain agar menghasilkan wawasan yang

bermakna dan tidak menyesatkan (Donthu *et al.*, 2021). Seluruh alur kerja mulai dari penelusuran, penyaringan PRISMA, prapemrosesan, hingga visualisasi didokumentasikan secara rinci guna menjamin transparansi dan keterulangan penelitian.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan metodologis yang perlu disadari sejak awal. Penggunaan Scopus sebagai sumber tunggal berpotensi mengeluarkan publikasi relevan yang hanya terindeks pada basis data lain seperti *Web of Science* atau IEEE Xplore. Pembatasan pada artikel jurnal berbahasa Inggris juga mengesampingkan prosiding konferensi dan literatur berbahasa lokal yang mungkin signifikan, khususnya pada bidang rekayasa yang banyak dipublikasikan melalui konferensi. Selain itu, jumlah sitasi bersifat dinamis dan mencerminkan kondisi pada saat penarikan data, sementara publikasi terbaru (2025-2026) secara alamiah memiliki sitasi rendah karena keterbatasan waktu akumulasi (*citation window*). Keterbatasan-keterbatasan ini menjadi pertimbangan penting dalam menafsirkan hasil, namun tidak mengurangi validitas pemetaan struktur bidang secara keseluruhan karena fokus analisis adalah pola agregat, bukan kasus individual.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Umum Korpus

Korpus akhir penelitian ini terdiri atas 303 artikel jurnal yang dipublikasikan pada rentang 2020-2026 dan tersebar pada 190 sumber publikasi yang berbeda. Seluruh dokumen (100%) berjenis artikel jurnal, yang menegaskan bahwa korpus telah melalui peninjauan sejawat penuh dan memiliki homogenitas unit analisis yang baik. Pembatasan pada artikel jurnal dengan mengeluarkan prosiding konferensi, bab buku, dan tinjauan editorial dilakukan secara sengaja untuk menjamin bahwa setiap dokumen merepresentasikan kontribusi penelitian yang telah tervalidasi secara metodologis, sehingga peta intelektual yang dihasilkan memiliki keandalan yang tinggi. Korpus melibatkan sekitar 1.330 penulis unik dengan rata-rata 4,80 penulis per dokumen, sementara hanya tujuh dokumen yang ditulis oleh penulis tunggal. Komposisi ini mengindikasikan bahwa riset akuakultur presisi berbasis IoT bersifat sangat kolaboratif dan multidisiplin, sebagaimana lazim ditemukan pada bidang yang memadukan

rekayasa perangkat keras, ilmu komputer, dan ilmu perikanan.

Sisi aksesibilitas, sebanyak 217 dokumen (71,6%) tersedia dalam status akses terbuka (*open access*) dalam berbagai skema (*gold*, *green*, maupun *hybrid*), sedangkan 86 dokumen (28,4%) bersifat berlangganan. Tingginya proporsi akses terbuka memperlihatkan komitmen komunitas riset terhadap diseminasi pengetahuan secara luas, sekaligus berimplikasi positif terhadap potensi sitasi dan adopsi praktis temuan oleh pembudidaya di negara berkembang. Proporsi akses terbuka yang melampaui dua pertiga korpus ini juga selaras dengan kebijakan pendanaan riset internasional yang semakin mensyaratkan keterbukaan luaran, dan secara khusus menguntungkan kawasan tropis penghasil akuakultur yang sering kali memiliki keterbatasan akses terhadap jurnal berlangganan.

Secara keseluruhan, korpus mengakumulasi 4.791 sitasi dengan rata-rata 15,81 sitasi per dokumen, nilai median 6 sitasi, dan sitasi maksimum 236 pada satu artikel. Perbedaan mencolok antara nilai rata-rata dan median mengindikasikan distribusi sitasi yang menjulur ke kanan (*right-skewed*), yang merupakan ciri khas literatur ilmiah: sejumlah kecil artikel berpengaruh menyerap porsi sitasi yang sangat besar, sementara mayoritas artikel memperoleh sitasi yang moderat. Sebanyak 56 dokumen (18,5%) belum memperoleh sitasi, yang sebagian besar merupakan publikasi terbaru pada 2025-2026 dan belum memiliki jendela waktu yang memadai untuk terakumulasi. Nilai h-indeks korpus sebesar 38 menunjukkan bahwa terdapat 38 artikel yang masing-masing telah disitasi paling sedikit 38 kali, sebuah indikator dampak ilmiah yang substansial untuk bidang yang relatif muda dan memperkuat kesimpulan bahwa akuakultur presisi berbasis IoT telah memiliki inti literatur yang mapan.

Tren Produktivitas dan Sitasi Tahunan

Analisis distribusi temporal mengungkap pola pertumbuhan publikasi yang konsisten dan pesat. Sebagaimana disajikan pada Tabel 1, jumlah publikasi meningkat dari 30 dokumen pada 2020 menjadi 73 dokumen pada 2025, dengan laju pertumbuhan tahunan majemuk (CAGR) sebesar 19,5% pada periode 2020-2025. Setelah relatif stabil pada kisaran 29-30 dokumen sepanjang 2020-2022, kurva produktivitas memperlihatkan titik belok yang jelas mulai

2023. Lonjakan paling tajam terjadi pada periode 2023-2024, ketika jumlah publikasi meningkat dari 44 menjadi 71 dokumen pertumbuhan sekitar 61% dalam satu tahun mengindikasikan momentum akselerasi yang dipicu oleh kematangan teknologi sensor berbiaya rendah, ketersediaan modul konektivitas berdaya rendah, serta meluasnya integrasi kecerdasan buatan generatif dan pembelajaran mendalam. Jumlah dokumen pada 2026 (26 dokumen) bersifat parsial karena data ditarik pada pertengahan tahun, sehingga tidak mencerminkan produksi tahunan penuh; bila diekstrapolasi secara linear, produksi 2026 berpotensi melampaui capaian 2025.

Pola sitasi memperlihatkan tren yang berbanding terbalik dengan produktivitas, sebagaimana wajar dalam analisis bibliometrik. Publikasi pada 2020 dan 2021 masing-masing mengakumulasi 1.056 dan 1.032 sitasi dengan rata-rata tertinggi (35,20 dan 35,59 sitasi per dokumen), karena memiliki jendela waktu akumulasi sitasi yang lebih panjang dan banyak di antaranya merupakan karya perintis yang menjadi rujukan dasar. Sebaliknya, publikasi 2024 dan 2025 menunjukkan rata-rata sitasi yang jauh lebih rendah (11,87 dan 4,62) meskipun jumlah dokumennya jauh lebih besar. Fenomena ini menegaskan bahwa dampak ilmiah memerlukan waktu untuk terakumulasi (*citation lag*), dan bahwa karya-karya fondasional bidang ini sebagian besar terbit pada paruh awal periode kajian. Kombinasi antara produktivitas yang terus menanjak dan basis sitasi yang kokoh pada karya awal menunjukkan bahwa bidang ini berada pada fase pertumbuhan yang sehat: terus menarik kontribusi baru sembari memiliki kanon rujukan yang stabil sebagai pijakan teoretis dan teknis. Bila tren ini berlanjut, dengan waktu penggandaan publikasi yang relatif singkat, korpus literatur akuakultur presisi berbasis IoT diproyeksikan akan berlipat ganda dalam kurun sekitar empat tahun ke depan, sehingga pemutakhiran peta bibliometrik secara berkala menjadi kebutuhan agar peneliti tetap dapat menavigasi perkembangan bidang yang sangat dinamis ini.

Tabel 1. Distribusi publikasi dan sitasi per tahun (2020–2026)

Tahun	Jumlah Dokumen	Total Sitasi	Rata-rata Sitasi
2020	30	1.056	35,20
2021	29	1.032	35,59

2022	30	791	26,37
2023	44	722	16,41
2024	71	843	11,87
2025	73	337	4,62
2026*	26	10	0,38
Total	303	4.791	15,81

*Data 2026 bersifat parsial (ditarik pada pertengahan tahun).
Sumber: olahan penulis dari data Scopus.

Sumber Publikasi Paling Produktif

Analisis sumber publikasi mengidentifikasi konsentrasi yang jelas pada sejumlah jurnal terkemuka. Sebagaimana disajikan pada Tabel 2, jurnal *Sensors* (MDPI) merupakan sumber paling produktif dengan 14 artikel, diikuti *IEEE Access* (10 artikel), *Aquacultural Engineering* (9 artikel), serta *Aquaculture International* dan *Scientific Reports* (masing-masing 7 artikel). Komposisi ini mencerminkan karakter interdisipliner bidang: jurnal berorientasi rekayasa dan instrumentasi seperti *Sensors* dan *IEEE Access* mendominasi, namun jurnal khusus akuakultur seperti *Aquacultural Engineering* dan *Aquaculture International* turut berperan signifikan, menandakan terjadinya konvergensi antara komunitas teknologi dan komunitas perikanan. Mayoritas jurnal inti tersebut terindeks pada kuartil teratas (Q1-Q2) Scopus, sehingga korpus tidak hanya produktif secara kuantitas tetapi juga memiliki reputasi dan dampak yang terjaga.

Kehadiran jurnal seperti *Smart Agricultural Technology* (6 artikel), *IEEE Internet of Things Journal* (4 artikel), dan *Sustainability* (4 artikel) memperlihatkan bahwa bidang ini juga bersinggungan dengan agenda pertanian cerdas, ekosistem IoT yang lebih luas, dan keberlanjutan. Pola ini menunjukkan bahwa akuakultur presisi tidak berdiri sendiri, melainkan menjadi bagian dari gelombang transformasi digital sektor pangan secara keseluruhan, sehingga temuan dan metode dari pertanian presisi kerap diadaptasi ke ranah akuatik. Tersebar 303 dokumen pada 190 sumber yang berbeda menunjukkan bahwa, meskipun terdapat jurnal-jurnal inti, bidang ini belum sepenuhnya terkonsolidasi pada wadah publikasi tertentu, melainkan masih menyebar lintas disiplin. Hal ini sejalan dengan hukum dispersi literatur *Bradford*, di mana sejumlah kecil jurnal inti memuat porsi artikel yang besar, sementara sisanya tersebar pada banyak jurnal perifer. Bagi peneliti, implikasinya adalah perlunya strategi penelusuran lintas basis data dan lintas disiplin agar tidak kehilangan literatur

relevan yang terbit di luar jurnal inti.

Tabel 2. Sumber publikasi paling produktif

Sumber Publikasi	Penerbit	Jumlah
Sensors	MDPI	14
IEEE Access	IEEE	10
Aquacultural Engineering	Elsevier	9
Aquaculture International	Springer	7
Scientific Reports	Nature	7
Smart Agricultural Technology	Elsevier	6
IEEE Internet of Things Journal	IEEE	4
Sustainability	MDPI	4

Penulis Paling Produktif

Pada tataran penulis, analisis mengungkap kemunculan kelompok-kelompok riset yang produktif. Sebagaimana disajikan pada Tabel 3, Arepalli, P. G. merupakan penulis paling produktif dengan tujuh artikel, diikuti Naik, K. J. dengan lima artikel; keduanya berasal dari National Institute of Technology Raipur, India, dan secara konsisten berkolaborasi mengembangkan kerangka pembelajaran mendalam untuk penilaian kualitas air dan deteksi dini hipoksia berbasis IoT (Arepalli & Naik, 2024; Arepalli & Jairam Naik, 2024). Kelompok produktif lain mencakup Shete, R. P., Bongale, A. M., dan Dharrao, D. yang berafiliasi di India serta berfokus pada prediksi oksigen terlarut menggunakan model ensemble machine learning (Shete et al., 2025), serta Ouyang, B. dan Wills, P. S. dari Amerika Serikat yang mengembangkan sistem robotik akuatik hibrida untuk akuakultur lepas pantai.

Kelompok dari Asia Timur turut menonjol, antara lain Sung, W.-T. dan Isa, I. G. T. yang mengembangkan sistem pemantauan akuakultur berbasis fusi data dan deep reinforcement learning (Sung et al., 2023), serta sejumlah peneliti Taiwan yang aktif pada tema AIoT dan digital twin. Distribusi penulis ini memperlihatkan bahwa produktivitas bidang digerakkan oleh sejumlah laboratorium riset yang terlembaga dengan agenda jangka panjang, terutama di India dan Taiwan, dan bahwa keberlanjutan kolaborasi antar-penulis inti merupakan motor utama akumulasi pengetahuan. Pola kepenulisan ini dengan rata-rata 4,80 penulis per dokumen dan hampir tidak adanya karya penulis tunggal juga menggarisbawahi

sifat tim sains (*team science*) bidang ini, di mana kepakaran lintas domain (sensor, jaringan, algoritma, biologi akuatik) harus dipadukan dalam satu kelompok. Dominasi kelompok-kelompok ini menegaskan pentingnya keberlanjutan pendanaan dan kolaborasi institusional dalam mempercepat akumulasi pengetahuan pada bidang yang padat teknologi, sekaligus menyiratkan adanya hambatan masuk bagi peneliti individu tanpa jejaring kolaborasi yang memadai.

Tabel 3. Penulis paling produktif

Penulis	Afiliasi Utama	Jumlah
Arepalli, P. G.	NIT Raipur, India	7
Naik, K. J.	NIT Raipur, India	5
Shete, R. P.	India	4
Bongale, A. M.	India	4
Ouyang, B.	Amerika Serikat	4
Wills, P. S.	Amerika Serikat	4
Sharma, A.	India	4

Distribusi Geografis

Analisis distribusi geografis berdasarkan afiliasi penulis (*first-author country*) menghasilkan temuan yang menarik dan relevan secara strategis. Sebagaimana disajikan pada Tabel 4, Indonesia merupakan negara penyumbang publikasi terbanyak dengan 55 dokumen, diikuti India (52 dokumen), Malaysia (34 dokumen), Taiwan (29 dokumen), dan Tiongkok (28 dokumen). Dominasi negara-negara Asia tropis dan subtropis ini bukan kebetulan: kawasan tersebut merupakan sentra produksi akuakultur dunia sekaligus menghadapi tekanan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan budi daya di tengah keterbatasan sumber daya dan tekanan iklim. Konsentrasi geografis ini mengonfirmasi bahwa agenda riset akuakultur presisi sangat dipengaruhi oleh kebutuhan produksi nyata di lapangan, bukan semata oleh ketersediaan infrastruktur riset.

Posisi Indonesia sebagai kontributor teratas mencerminkan urgensi nasional dalam memodernisasi sektor akuakultur mulai dari budi daya udang vaname dan windu, ikan air tawar, hingga rumput laut melalui adopsi teknologi terjangkau. Sejumlah karya dari Indonesia berfokus pada solusi berbiaya rendah yang kontekstual, seperti integrasi IoT dengan chatbot untuk pemantauan tambak (Al Rasyid *et al.*, 2020), sistem kendali akuarium berbasis IoT (Abdurohman *et al.*, 2022), pemantauan suhu air tambak udang windu menggunakan sensor

DS18B20 (Satra *et al.*, 2024), serta pemantauan kualitas air yang dipengaruhi cuaca tropis (Riftiarrasyid & Soewito, 2024). Karya-karya tersebut mengilustrasikan kekuatan kontekstual riset Indonesia yang menekankan keterjangkauan dan kesesuaian dengan kondisi lokal. Kehadiran negara-negara non-Asia seperti Amerika Serikat (16 dokumen), Britania Raya (10 dokumen), Australia (9 dokumen), dan Spanyol (9 dokumen) menunjukkan bahwa bidang ini juga menarik minat riset di negara maju, umumnya dengan penekanan pada akuakultur lepas pantai, sistem resirkulasi (RAS), dan integrasi kecerdasan buatan tingkat lanjut. Kontras orientasi riset antara kawasan berkembang dan kawasan maju ini keterjangkauan versus kecanggihan analitik membuka peluang besar bagi kolaborasi Utara dan Selatan yang saling melengkapi serta menjadi salah satu agenda strategis yang patut didorong di masa depan.

Tabel 4. Negara penyumbang publikasi terbanyak (berdasarkan afiliasi)

Negara	Jumlah Dokumen	Peringkat
Indonesia	55	1
India	52	2
Malaysia	34	3
Taiwan	29	4
Tiongkok	28	5
Bangladesh	18	6
Amerika Serikat	16	7
Britania Raya	10	8
Australia	9	9
Spanyol	9	9

Dokumen Paling Berpengaruh

Analisis dokumen paling banyak disitasi mengungkap fondasi intelektual bidang akuakultur presisi berbasis IoT. Sebagaimana disajikan pada Tabel 5, artikel paling berpengaruh adalah tinjauan oleh Yang *et al.* (2021) yang diterbitkan di *Archives of Computational Methods in Engineering* dengan 236 sitasi, membahas model visi komputer untuk deteksi dan analisis perilaku ikan dalam akuakultur cerdas. Dominasi artikel ini menandakan bahwa visi komputer dan analitik citra merupakan salah satu pilar konseptual yang paling matang dan banyak dirujuk, sekaligus mengindikasikan pergeseran perhatian dari sekadar penginderaan parameter fisikokimia menuju pemahaman perilaku biologis organisme budi daya. Bahwa artikel paling berpengaruh berbentuk tinjauan (*review*) juga lazim dalam

bibliometrik, karena artikel tinjauan kerap berfungsi sebagai pintu masuk pengetahuan dan dirujuk lintas subtopik.

Pada peringkat berikutnya, Hang *et al.* (2020) memperoleh 211 sitasi melalui karyanya mengenai platform peternakan ikan aman berbasis blockchain untuk integritas data pertanian, yang menegaskan pentingnya keamanan dan ketertelusuran data dalam ekosistem IoT akuakultur. Huan *et al.* (2020) dengan 181 sitasi merancang sistem pemantauan kualitas air tambak berbasis NB-IoT, menjadi rujukan utama bagi arsitektur konektivitas berdaya rendah dan banyak diadaptasi pada implementasi lapangan di Asia. Adapun Chiu *et al.* (2022) dengan 152 sitasi mengembangkan sistem manajemen tambak cerdas yang memadukan IoT dengan model surogat berbasis kecerdasan buatan, sebuah karya yang secara eksplisit menjembatani lapisan sensor dengan lapisan pengambilan keputusan, dan karenanya sangat selaras dengan tesis kontinum yang menjadi kerangka penelitian ini.

Sejumlah karya berpengaruh lain memperkuat tema kontinum sensor-ke-keputusan. Jamroen *et al.* (2023) merancang sistem pemantauan kualitas air bertenaga surya berbasis NB-IoT (93 sitasi) yang menonjolkan dimensi keberlanjutan energi; Gambin *et al.* (2021) menerapkan pembelajaran mendalam untuk penilaian dan peramalan kualitas air ekosistem laut (80 sitasi); Chen *et al.* (2022)

mengembangkan sistem pemantauan kualitas air tambak ikan berbasis IoT (80 sitasi); serta Wang *et al.* (2020) mendeteksi perilaku anomali ikan bawah air menggunakan teknik kecerdasan buatan (76 sitasi). Lin *et al.* (2021) dengan sistem multi-sensor nirkabel (75 sitasi) dan Yang *et al.* (2021) tentang pemantauan partikulat berbasis AIIoT (75 sitasi) memperkuat lapisan akuisisi dan analitik, sementara Thai-Nghe *et al.* (2020) menerapkan pembelajaran mendalam untuk peramalan kualitas air (65 sitasi).

Karya Ubina *et al.* (2023) tentang peternakan ikan cerdas berbasis digital twin dan AIIoT (69 sitasi), Arepalli & Jairam Naik (2024) tentang jaringan saraf konvolusi spasial-temporal untuk klasifikasi kualitas air kolam akuakultur (67 sitasi), serta Zhang *et al.* (2021) tentang sistem ketertelusuran berbasis *blockchain*-IoT untuk produk akuatik beku (61 sitasi) menggambarkan perluasan *frontier* riset menuju representasi digital sistem budi daya, analitik spasial temporal, dan manajemen rantai pasok. Komposisi dokumen paling berpengaruh ini menegaskan bahwa fondasi intelektual bidang dibangun di atas tiga pilar yang saling terkait: penginderaan kualitas air, analitik kecerdasan buatan, serta keamanan dan ketertelusuran data. Sebaran tahun terbit dari sepuluh karya teratas yang mayoritas berada pada 2020-2022 sekaligus mengonfirmasi bahwa periode tersebut merupakan fase pembentukan kanon (*canon-forming period*) bagi bidang ini.

Tabel 5. Lima belas artikel paling banyak disitasi

Penulis & Judul Ringkas	Sumber (Tahun)	Sitasi
Yang, L. <i>et al.</i> – Computer vision models in intelligent aquaculture	Arch. Comput. Methods Eng. (2021)	236
Hang, L. <i>et al.</i> – Secure fish farm platform based on blockchain	Comput. Electron. Agric. (2020)	211
Huan, J. <i>et al.</i> – Water quality monitoring NB-IoT	Aquacult. Eng. (2020)	181
Chiu, M.-C. <i>et al.</i> – Smart farm management IoT & AI surrogate	J. Agric. Food Res. (2022)	152
Jamroen, C. <i>et al.</i> – PV/battery NB-IoT water quality	Smart Agric. Technol. (2023)	93
Chen, C.-H. <i>et al.</i> – IoT-based fish farm water quality	Sensors (2022)	80
Gambin, A. F. <i>et al.</i> – Deep learning for marine water quality	IEEE Access (2021)	80
Wang, J.-H. <i>et al.</i> – Anomalous fish behavior detection (AI)	IEEE Access (2020)	76
Lin, J.-Y. <i>et al.</i> – Wireless multi-sensor water quality	Sensors (2021)	75
Yang, C.-T. <i>et al.</i> – AIIoT for particulate matter monitoring	J. Hazard. Mater. (2021)	75
Ubina, N. A. <i>et al.</i> – Digital twin fish farming (AIIoT)	Smart Agric. Technol. (2023)	69
Arepalli & Jairam Naik – DSTCNN aqua-ponds	Aquacult. Eng. (2024)	67
Thai-Nghe, N. <i>et al.</i> – Deep learning water quality forecast	IJACSA (2020)	65
Zhang, Y. <i>et al.</i> – Blockchain-IoT traceability	J. Food Process Eng. (2021)	61
Bates, H. <i>et al.</i> – LoRaWAN IoT environmental monitoring	Sensors (2021)	60

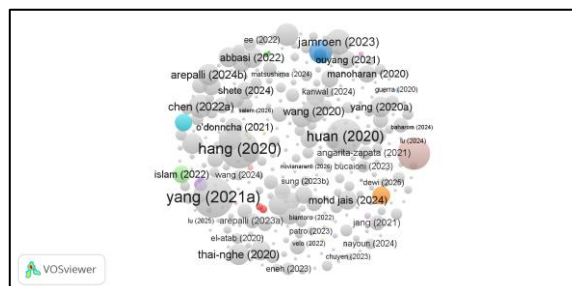
Jaringan Sitasi

Analisis jaringan sitasi pada tingkat dokumen divisualisasikan pada Gambar 1. Visualisasi memperlihatkan bahwa korpus membentuk satu komponen besar yang saling terhubung, dengan simpul-simpul berukuran besar merepresentasikan karya-karya yang paling banyak disitasi dan menjadi titik tumpu jaringan. Karya Yang (2021a), Huan (2020), dan Hang (2020) tampil sebagai simpul dominan yang menjadi rujukan silang bagi banyak publikasi berikutnya, menegaskan posisinya sebagai fondasi intelektual bidang. Kemunculan simpul Jamroen (2023) yang berukuran relatif besar menunjukkan bahwa karya pada paruh kedua periode kajian pun mampu memperoleh sentralitas tinggi dalam waktu singkat, suatu indikasi bahwa bidang masih dinamis dan terbuka bagi munculnya rujukan baru.

Pewarnaan simpul pada Gambar 1 menandai keanggotaan klaster sitasi yang merefleksikan komunitas riset dengan keterhubungan rujukan yang erat. Sebagian besar simpul berwarna abu-abu menunjukkan dokumen dengan keterkaitan sitasi langsung yang lebih lemah atau publikasi terbaru yang belum sepenuhnya terintegrasi ke dalam struktur sitasi inti. Keberadaan beberapa simpul berwarna mencolok seperti Ouyang (2021), O'Donncha (2021), Islam (2022), dan Dewi (2025) mengindikasikan adanya subkomunitas riset spesifik yang membentuk lintasan sitasi tersendiri, misalnya yang berfokus pada sistem robotik akuatik, analitik perilaku ikan, atau penerapan kontekstual di kawasan tertentu. Secara umum, struktur jaringan sitasi memperlihatkan bidang yang sudah memiliki inti intelektual yang mapan namun tetap terbuka terhadap percabangan tematik baru, sebuah karakteristik bidang yang berada pada fase pertumbuhan aktif dan belum mengalami penjumlahan.

Lebih lanjut, distribusi ukuran simpul yang sangat timpang dengan segelintir simpul besar dikelilingi oleh banyak simpul kecil mencerminkan pola sitasi preferensial (*preferential attachment*), di mana karya yang telah banyak disitasi cenderung terus menarik sitasi baru. Pola ini menjelaskan mengapa karya-karya perintis tahun 2020-2021 mempertahankan dominasinya meskipun terus bermunculan publikasi baru. Bagi peneliti doktoral, jaringan sitasi ini berfungsi sebagai peta orientasi yang menunjukkan karya mana yang wajib dikuasai sebagai landasan teoretis, sekaligus

mengidentifikasi simpul-simpul perantara yang menghubungkan subkomunitas berbeda dan karenanya berpotensi menjadi titik temu bagi riset interdisipliner yang menjembatani lapisan penginderaan dengan lapisan pengambilan keputusan.



Gambar 1. Visualisasi jaringan sitasi antar-dokumen

Ko-okurensi Kata Kunci dan Struktur Tematik

Analisis ko-okurensi kata kunci memberikan gambaran paling kaya mengenai struktur tematik bidang. Dari korpus, kata kunci penulis yang paling sering muncul adalah "aquaculture" (80 kali), "Internet of Things" (70 kali), "iot" (62 kali), "machine learning" (34 kali), "water quality" (28 kali), "water quality monitoring" (21 kali), dan "deep learning" (20 kali), sebagaimana dirangkum pada Tabel 6. Frekuensi tinggi istilah kualitas air dan pemantauannya menegaskan bahwa pengelolaan parameter air tetap menjadi persoalan sentral, sementara tingginya kemunculan pembelajaran mesin dan pembelajaran mendalam menandakan bahwa analitik cerdas telah menjadi komponen integral, bukan sekadar pelengkap. Kemunculan "dissolved oxygen" (13 kali) dan "sensors" (15 kali) di antara kata kunci teratas turut menegaskan bahwa oksigen terlarut—parameter yang paling kritis bagi kelangsungan hidup organisme budi daya—menjadi titik perhatian utama pada lapisan penginderaan.

Visualisasi jaringan ko-okurensi pada Gambar 2 mengelompokkan kata kunci ke dalam lima klaster tematik utama yang ditandai dengan warna berbeda, dengan istilah "Internet of Things" dan "machine learning" menempati posisi sentral sebagai penghubung antarklaster. Lima klaster tersebut dapat dimaknai sebagai representasi kontinum "from sensors to decision support" sebagai berikut.

Klaster pertama (merah) merepresentasikan lapisan penginderaan dan parameter fisikokimia air, mencakup kata kunci seperti "dissolved oxygen", "ammonia",

"sensor", "ph", "water temperature", "lorawan", "blynk", "cloud computing", "energy efficiency", dan "smart aquaculture". Klaster ini menggambarkan fondasi perangkat keras dan akuisisi data—titik awal kontinum—di mana fokus riset adalah pengukuran parameter kritis secara akurat, hemat energi, dan terhubung. Kehadiran "blynk" dan "lorawan" menandakan kuatnya tema implementasi prototipe berbiaya rendah dengan platform IoT siap pakai, yang banyak diusung oleh peneliti dari kawasan berkembang sebagaimana terlihat pada analisis geografis.

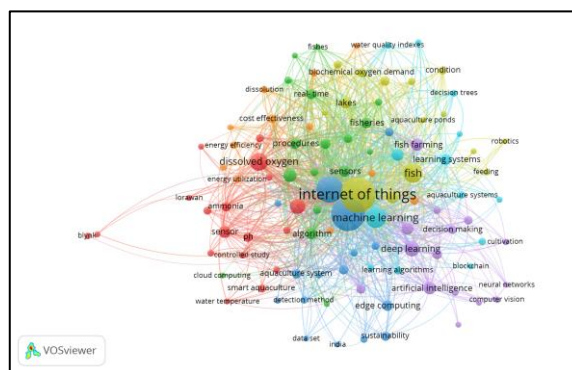
Klaster kedua (hijau) berpusat pada pemantauan kualitas air dan lingkungan akuatik, mencakup "water quality indexes", "biochemical oxygen demand", "lakes", "fisheries", "aquaculture ponds", "real-time", "dissolution", "cost effectiveness", dan "procedures". Klaster ini menjembatani data sensor mentah dengan indikator kualitas air yang bermakna secara ekologis, menekankan pemantauan waktu nyata dan efektivitas biaya sebagai pertimbangan praktis dalam penerapan lapangan. Pergerakan dari klaster merah ke klaster hijau merepresentasikan transformasi dari pengukuran tunggal menjadi indeks komposit yang dapat ditafsirkan oleh pengelola budi daya.

Klaster ketiga (biru) merupakan inti integrasi teknologi, dengan "Internet of Things" dan "machine learning" sebagai simpul terbesar, didukung "algorithm", "aquaculture system", "learning algorithms", "edge computing", "data set", dan "sustainability". Klaster ini memosisikan IoT dan pembelajaran mesin sebagai tulang punggung yang menghubungkan akuisisi data dengan pemrosesan cerdas, sekaligus memunculkan komputasi tepi (*edge computing*) sebagai paradigma yang memindahkan analitik lebih dekat ke sumber data demi efisiensi dan responsivitas. Posisi klaster ini sebagai pusat gravitasi seluruh jaringan menegaskan perannya sebagai penghubung struktural antara lapisan hulu (penginderaan) dan lapisan hilir (keputusan).

Klaster keempat (kuning) berfokus pada budi daya ikan cerdas, mencakup "fish", "fish farming", "learning systems", "feeding", "condition", "decision trees", "robotics", dan "aquaculture systems". Klaster ini merepresentasikan aplikasi spesifik teknologi pada manajemen budi daya, seperti otomatisasi pemberian pakan, penilaian kondisi ikan, dan pemanfaatan robotika, yang menandai

pergerakan menuju otomatisasi operasional. Keterkaitan klaster ini dengan klaster biru menunjukkan bahwa aplikasi budi daya cerdas dibangun langsung di atas kapabilitas analitik inti.

Klaster kelima (ungu) merepresentasikan ujung kontinum, yaitu kecerdasan buatan tingkat lanjut dan pengambilan keputusan, mencakup "artificial intelligence", "deep learning", "decision making", "computer vision", "neural networks", "blockchain", dan "cultivation". Klaster ini menggambarkan frontier riset di mana sistem tidak hanya memantau dan memprediksi, tetapi juga mendukung bahkan mengotomatisasi keputusan pengelolaan, sekaligus menjamin integritas data melalui *blockchain*. Keterhubungan erat antara klaster ungu dengan klaster biru pada Gambar 2 mengonfirmasi bahwa lapisan pengambilan keputusan dibangun langsung di atas inti IoT dan pembelajaran mesin, dan bahwa visi komputer serta jaringan saraf menjadi instrumen utama dalam menerjemahkan data menjadi keputusan.



Gambar 2. Visualisasi jaringan ko-okurensi kata kunci (lima klaster tematik)

Secara keseluruhan, kelima klaster tersebut tersusun membentuk gradien yang koheren: dari sensor dan parameter air (klaster merah), ke indikator kualitas air (klaster hijau), melalui inti IoT–pembelajaran mesin (klaster biru), menuju aplikasi budi daya cerdas (klaster kuning), dan berujung pada kecerdasan tingkat lanjut serta pengambilan keputusan (klaster ungu). Struktur ini secara empiris memvalidasi tesis "*from sensors to decision support*" yang menjadi kerangka penelitian ini, dan menunjukkan bahwa bidang telah berkembang dari kumpulan teknologi penginderaan terpisah menjadi sebuah arsitektur terintegrasi yang berorientasi pada nilai keputusan. Gradien tematik ini bukan sekadar pengelompokan statistik, melainkan cerminan dari arsitektur sistem akuakultur cerdas

yang sesungguhnya, sehingga peta ini dapat berfungsi sebagai kerangka rujukan bagi peneliti untuk memosisikan kontribusinya pada lapisan kontinum yang tepat.

Tabel 6. Kata kunci paling sering muncul dan klaster tematik

Kata Kunci	Frekuensi	Klaster Tematik
aquaculture	80	Lintas klaster
Internet of Things	70	Biru-inti integrasi
iot	62	Biru-inti integrasi
machine learning	34	Biru-inti integrasi
water quality	28	Hijau-kualitas air
water quality monitoring	21	Hijau-kualitas air
deep learning	20	Ungu-AI & keputusan
sensors	15	Merah-penginderaan
dissolved oxygen	13	Merah-penginderaan

Pembahasan

Hasil analisis bibliometrik terhadap 303 artikel ini memberikan beberapa wawasan penting mengenai perkembangan akuakultur presisi berbasis IoT. Pertama, pertumbuhan publikasi dengan CAGR 19,5% dan akselerasi tajam pada 2023–2024 menegaskan bahwa bidang ini berada pada fase pertumbuhan yang dinamis dan belum mencapai titik jenuh. Pola ini konsisten dengan kematangan ekosistem teknologi pemungkin sensor berbiaya rendah, konektivitas LPWAN seperti LoRaWAN dan NB-IoT, serta demokratisasi pustaka kecerdasan buatan yang menurunkan hambatan masuk bagi peneliti dari beragam latar belakang dan negara. Implikasinya, peneliti doktoral memiliki ruang yang luas untuk berkontribusi, terutama pada subtopik yang belum terkonsolidasi, sebagaimana ditegaskan pula oleh tinjauan sistematis terkini mengenai sensor dan IoT untuk pemantauan kualitas air (Rojas *et al.*, 2025).

Kedua, struktur tematik yang terungkap melalui lima klaster ko-okurensi memvalidasi secara empiris kerangka kontinum "from sensors to decision support". Temuan ini sejalan dengan evolusi konseptual akuakultur presisi yang bergerak dari pengamatan (*observe*), ke interpretasi (*interpret*), lalu pengambilan keputusan (*decide*), dan akhirnya tindakan (*act*) sebagaimana dikemukakan dalam literatur akuakultur presisi (O'Donncha *et al.*, 2021). Posisi sentral "*Internet of Things*" dan "*machine*

learning" sebagai penghubung antarklaster menunjukkan bahwa kedua teknologi inilah yang mengintegrasikan lapisan-lapisan tersebut menjadi sistem yang utuh. Pergeseran dari klaster penginderaan menuju klaster kecerdasan buatan tingkat lanjut mencerminkan kematangan bidang yang tidak lagi berhenti pada pengumpulan data, melainkan menuntut nilai aktual berupa keputusan yang lebih baik (Chiu *et al.*, 2022; Ubina *et al.*, 2023). Hal ini juga didukung oleh maraknya pendekatan fusi data dan pembelajaran penguatan mendalam yang memungkinkan sistem belajar dari dinamika lingkungan secara adaptif (Sung *et al.*, 2023).

Ketiga, dominasi karya visi komputer (Yang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020) dan digital twin (Ubina *et al.*, 2023) di antara dokumen paling berpengaruh menandakan bahwa frontier riset bergeser dari pemantauan parameter abiotik menuju pemahaman langsung terhadap organisme budi daya perilaku, kondisi kesehatan, dan respons terhadap lingkungan. Sementara itu, kehadiran tema blockchain (Hang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021) menunjukkan bahwa keamanan, integritas, dan ketertelusuran data menjadi perhatian yang menyertai meningkatnya volume dan nilai data akuakultur. Ketiga frontier ini visi komputer, kembaran digital, dan keamanan data berpotensi menjadi arah pengembangan strategis dalam dekade mendatang, terutama ketika dipadukan dengan kemampuan peramalan dini terhadap kejadian kritis seperti hipoksia (Arepalli & Naik, 2024).

Keempat, temuan geografis yang menempatkan Indonesia sebagai kontributor teratas memiliki implikasi strategis yang khusus. Sebagai negara kepulauan dengan sektor akuakultur yang vital bagi perekonomian serta ketahanan pangan, kepemimpinan Indonesia dalam volume publikasi merupakan modal berharga, terlebih ketika produksi akuakultur global telah melampaui perikanan tangkap dan menjadi tumpuan utama pasokan pangan akuatik dunia (FAO, 2024). Namun, perlu dicermati bahwa banyak karya dari kawasan berkembang berfokus pada implementasi prototipe berbiaya rendah berbasis platform siap pakai seperti Blynk dan mikrokontroler ESP32 (Al Rasyid *et al.*, 2020; Satra *et al.*, 2024). Meskipun bernilai praktis tinggi dan kontekstual, karya semacam ini cenderung memperoleh sitasi lebih rendah dibandingkan karya yang menghasilkan kerangka algoritmik atau konseptual baru. Tantangan bagi komunitas riset di kawasan tropis

adalah meningkatkan kontribusi pada lapisan analitik dan pengambilan keputusan yang bernilai kebaruan tinggi, tanpa kehilangan keunggulan kontekstualnya, misalnya dengan mengembangkan model prediktif yang disesuaikan dengan dinamika cuaca tropis (Riftiarrasyid & Soewito, 2024) atau pendekatan logika fuzzy untuk penilaian kualitas air (Nagothu *et al.*, 2025).

Kelima, analisis ini mengidentifikasi sejumlah celah riset yang dapat menjadi agenda ke depan. (1) Interoperabilitas dan standarisasi: tingginya keragaman platform dan sensor menimbulkan tantangan integrasi, sementara riset mengenai arsitektur dan protokol standar masih terbatas. (2) Keberlanjutan energi: meskipun "*energy efficiency*" muncul sebagai kata kunci, solusi pemanenan energi mandiri untuk penerapan jangka panjang di lokasi terpencil belum banyak dieksplorasi, padahal sistem bertenaga surya telah menunjukkan kelayakan (Jamroen *et al.*, 2023). (3) Kecerdasan tepi (*edge intelligence*): pemindahan analitik ke perangkat tepi untuk mengurangi ketergantungan pada konektivitas dan latensi masih merupakan area yang sedang tumbuh, termasuk melalui pendekatan pembelajaran terfederasi yang menjaga privasi data (Khuen Cheng *et al.*, 2025). (4) Sistem pendukung keputusan yang dapat ditindaklanjuti: sebagian besar sistem masih berhenti pada pemantauan dan prediksi, sementara penutupan lingkaran kendali (*closed-loop control*) yang mengotomatisasi aktuator berdasarkan keputusan cerdas masih jarang. (5) Validasi lapangan jangka panjang dan skalabilitas ekonomi: banyak studi bersifat purwarupa skala laboratorium, sehingga bukti efektivitas biaya dan keandalan pada skala komersial masih perlu diperkuat melalui uji lapangan multimusim.

Keenam, dari perspektif praktis, temuan ini memberikan panduan bagi pemangku kepentingan. Bagi pembuat kebijakan, tingginya proporsi akses terbuka dan dominasi solusi berbiaya rendah membuka peluang transfer teknologi yang inklusif bagi pembudidaya kecil, sekaligus menuntut dukungan infrastruktur konektivitas di kawasan pedesaan dan pesisir. Bagi industri, peta kluster tematik dapat menjadi dasar dalam memprioritaskan investasi riset dan pengembangan, khususnya pada integrasi AIoT dan sistem pendukung keputusan yang dapat ditindaklanjuti. Bagi akademisi, pemetaan ini menyediakan rujukan untuk memosisikan riset

baru secara strategis, mengidentifikasi mitra kolaborasi dari kelompok-kelompok produktif yang telah teridentifikasi, serta memilih lapisan kontinum yang paling membutuhkan kontribusi kebaruan. Dengan demikian, hasil bibliometrik ini tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga preskriptif dalam memandu arah penelitian dan kebijakan.

Ketujuh, temuan penelitian ini perlu didudukkan dalam konteks kajian sebidang yang telah ada. Tinjauan-tinjauan terdahulu mengenai sensor dan IoT untuk pemantauan kualitas air (Rojas *et al.*, 2025) maupun ulasan umum penerapan teknologi dalam akuakultur (Manan *et al.*, 2023) cenderung bersifat naratif dan menekankan inventarisasi teknologi, tanpa memetakan struktur intelektual dan dinamika sitasi bidang secara kuantitatif. Penelitian ini melengkapi kesenjangan tersebut dengan menyediakan bukti empiris berbasis 303 dokumen mengenai siapa aktor utamanya, bagaimana tema-tema saling terkait, dan ke arah mana frontier riset bergerak. Konvergensi antara temuan kluster tematik di sini dengan kerangka konseptual akuakultur presisi yang berorientasi pada siklus pengamatan keputusan (O'Donncha *et al.*, 2021) memperkuat keyakinan bahwa kontinum "*from sensors to decision support*" bukan sekadar konstruksi retorik, melainkan struktur yang benar-benar tercermin dalam pola publikasi dan sitasi global. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi metodologis sekaligus substantif bagi pemahaman lintasan perkembangan bidang.

Penelitian ini tidak terlepas dari keterbatasan. Penggunaan Scopus sebagai sumber tunggal serta pembatasan pada artikel jurnal berbahasa Inggris berpotensi mengeluarkan literatur relevan dari basis data lain seperti Web of Science dan IEEE Xplore, serta prosiding konferensi yang banyak memuat riset rekayasa IoT tahap awal. Analisis sitasi juga mencerminkan kondisi pada saat penarikan data dan kurang menguntungkan bagi publikasi terbaru yang belum memiliki jendela akumulasi memadai. Selain itu, interpretasi kluster ko-okurensi bersifat kualitatif dan bergantung pada parameter ambang serta metode normalisasi yang dipilih dalam VOSviewer. Penelitian lanjutan disarankan menggabungkan Scopus dan Web of Science, menyertakan analisis kopling bibliografi dan ko-sitasi penulis, serta melakukan analisis evolusi tematik temporal (*thematic evolution*) untuk menangkap dinamika

pergeseran fokus riset secara lebih mendalam dari waktu ke waktu.

Kesimpulan

Penelitian ini telah memetakan secara komprehensif struktur intelektual dan dinamika riset akuakultur presisi berbasis IoT melalui analisis bibliometrik terhadap 303 artikel terindeks Scopus pada periode 2020–2026. Bidang ini terbukti berada pada fase pertumbuhan pesat (CAGR 19,5%) dengan dampak ilmiah yang substansial (4.791 sitasi; h-indeks korpus 38), digerakkan oleh komunitas riset yang sangat kolaboratif dan multidisiplin dengan rata-rata 4,80 penulis per dokumen. Jurnal *Sensors* dan *IEEE Access* menjadi sumber paling produktif, sementara Indonesia, India, dan Malaysia memimpin sebagai negara penyumbang publikasi, mencerminkan urgensi modernisasi akuakultur di kawasan tropis penghasil produk akuatik utama dunia.

Temuan utama penelitian ini adalah tervalidasinya secara empiris kontinum "from sensors to decision support" melalui lima klaster tematik yang tersusun koheren dari penginderaan parameter air, pemantauan kualitas air, inti integrasi IoT–pembelajaran mesin, budi daya ikan cerdas, hingga kecerdasan buatan tingkat lanjut dan pengambilan keputusan. Fondasi intelektual bidang dibangun di atas tiga pilar yang saling terkait, yaitu penginderaan kualitas air, analitik kecerdasan buatan, serta keamanan dan ketertelusuran data. Pergeseran fokus riset dari akuisisi data menuju analitik prediktif dan otomatisasi keputusan menandai kematangan bidang yang semakin berorientasi pada nilai keputusan, dengan visi komputer, kembar digital, dan *blockchain* sebagai *frontier* yang paling menjanjikan.

Sebagai penutup, penelitian ini menyimpulkan bahwa masa depan akuakultur presisi berbasis IoT terletak pada penutupan lingkaran kendali yang mengubah data menjadi tindakan otomatis dan cerdas, didukung interoperabilitas yang terstandar, kecerdasan tepi yang efisien energi, serta validasi ekonomi pada skala komersial. Bagi komunitas riset di Indonesia dan negara tropis lainnya, terdapat peluang strategis untuk beralih dari peran sebagai pengadopsi teknologi berbiaya rendah menuju pencipta kerangka analitik dan sistem pendukung keputusan yang bernilai kebaruan tinggi sekaligus kontekstual. Peta jalan yang dihasilkan

penelitian ini diharapkan menjadi landasan bagi penelitian doktoral lanjutan, perumusan kebijakan transfer teknologi yang inklusif, serta pengembangan industri akuakultur cerdas yang berkelanjutan dan berdaya saing global. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengoperasionalan kerangka kontinum "*from sensors to decision support*" sebagai lensa analitik yang secara empiris diuji terhadap struktur tematik bidang, sehingga melampaui tinjauan deskriptif yang lazim dan menawarkan kerangka konseptual yang dapat dimanfaatkan untuk memetakan posisi setiap kontribusi riset di sepanjang lintasan dari penginderaan hingga keputusan. Dengan demikian, artikel ini tidak hanya merangkum apa yang telah dicapai, tetapi juga menyediakan instrumen berpikir bagi komunitas akademik untuk merancang agenda riset akuakultur presisi yang lebih terarah, kolaboratif, dan berdampak pada masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga artikel penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Apresiasi khusus kami sampaikan kepada rekan sejawat atas masukan konstruktif selama proses penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga kami tujukan kepada keluarga dan sahabat atas dukungan serta semangat yang tak pernah surut selama proses penyusunan penelitian ini.

Referensi

- Abdurohman, M., Putrada, A. G., & Deris, M. M. (2022). A robust *Internet of Things*-based aquarium control system using decision tree regression algorithm. *IEEE Access*, 10, 56937–56951.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177225>
- Al Rasyid, M. U. H., Sukaridhoto, S., Dzulkornain, M. I., & Rifa'i, A. (2020). Integration of IoT and chatbot for aquaculture with natural language processing. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(2), 640–648.
<https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V18I2.14788>

- Arepalli, P. G., & Jairam Naik, K. (2024). An IoT based smart water quality assessment framework for aqua-ponds management using Dilated Spatial-temporal Convolution Neural Network (DSTCNN). *Aquacultural Engineering*, 104, 102373. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102373>
- Arepalli, P. G., & Naik, K. J. (2024). A deep learning-enabled IoT framework for early hypoxia detection in aqua water using lightweight spatially shared attention-LSTM network. *The Journal of Supercomputing*, 80(2), 2718–2747. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05580-x>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bates, H., Pierce, M., & Benter, A. (2021). Real-time environmental monitoring for aquaculture using a LoRaWAN-based IoT sensor network. *Sensors*, 21(23), 7963. <https://doi.org/10.3390/s21237963>
- Chen, C.-H., Wu, Y.-C., Zhang, J.-X., & Chen, Y.-H. (2022). IoT-based fish farm water quality monitoring system. *Sensors*, 22(17), 6700. <https://doi.org/10.3390/s22176700>
- Chiu, M.-C., Yan, W.-M., Bhat, S. A., & Huang, N.-F. (2022). Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100357>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Gambin, A. F., Angelats, E., González, J. S., Miozzo, M., & Dini, P. (2021). Sustainable marine ecosystems: Deep learning for water quality assessment and forecasting. *IEEE Access*, 9, 121344–121365. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109216>
- Hang, L., Ullah, I., & Kim, D.-H. (2020). A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105251. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105251>
- Huan, J., Li, H., Wu, F., & Cao, W. (2020). Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT. *Aquacultural Engineering*, 90, 102088. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>
- Jamroen, C., Yonsiri, N., Odthon, T., Wisitthiwong, N., & Janreung, S. (2023). A standalone photovoltaic/battery energy-powered water quality monitoring system based on narrowband *Internet of Things* for aquaculture: Design and implementation. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100072>
- Khuen Cheng, W., Boon Tan, T., San Tan, J., Yi-Le Chan, J., Thye Bea, K., & Chen, Y.-L. (2025). Smart aquaculture: Integrating computer vision and IoT for automated crayfish health assessment via federated learning. *IEEE Access*, 13, 189979–189994. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3624140>
- Lin, J.-Y., Tsai, H.-L., & Lyu, W.-H. (2021). An integrated wireless multi-sensor system for monitoring the water quality of aquaculture. *Sensors*, 21(24), 8179. <https://doi.org/10.3390/s21248179>
- Manan, H., Jalilah, M., Fauzan, F., Ikhwanuddin, M., Amin-Safwan, A., Abdullah, N. S., Nur-Syahirah, M., & Kasan, N. A. (2023). Recent developments in aquaculture – A review. *Annals of Animal Science*, 23(3), 663–684. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0044>
- Nagothu, S. K., Bindu Sri, P., Anitha, G., Vincent, S., & Kumar, O. P. (2025). Advancing aquaculture: Fuzzy logic-based water quality monitoring and maintenance system for precision aquaculture. *Aquaculture International*, 33(1), 32. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01701-2>

- O'Donncha, F., Stockwell, C. L., Planellas, S. R., Micallef, G., Palmes, P., Webb, C., Filgueira, R., & Grant, J. (2021). Data driven insight into fish behaviour and their use for precision aquaculture. *Frontiers in Animal Science*, 2, 695054. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.695054>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Riftiarrasyid, M. F., & Soewito, B. (2024). Monitoring water quality parameters impacted by Indonesia's weather using *Internet of Things*. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 35(3), 1426–1436. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v35.i3.pp1426-1436>
- Rojas, J. J. H., Bonifacio, R. F. A., Peña, J. M. B., León, D. R. Q., Peña, C. D. R., & Torres, K. G. P. (2025). Sensors and IoT for water quality monitoring: A systematic review of technologies and field validation. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 6(6), 2789–2806. <https://doi.org/10.18196/jrc.v6i6.28457>
- Satra, R., Hadi, M. S., Sujito, Febryan, Fattah, M. H., & Busaeri, S. R. (2024). IoAT: Internet of Aquaculture *Things* for monitoring water temperature in tiger shrimp ponds with DS18B20 sensors and WeMos D1 R2. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 5(1), 62–71. <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i1.18470>
- Shete, R. P., Shekhar, C. A., Mahajan, Y. V., Bongale, A. M., & Dharrao, D. (2025). IoT-driven ensemble machine learning model for accurate dissolved oxygen prediction in aquaculture. *Discover Internet of Things*, 5(1), 94. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00201-w>
- Sung, W.-T., Isa, I. G. T., & Hsiao, S.-J. (2023). Designing aquaculture monitoring system based on data fusion through deep reinforcement learning (DRL). *Electronics*, 12(9), 2032. <https://doi.org/10.3390/electronics12092032>
- Thai-Nghe, N., Thanh-Hai, N., & Ngon, N. C. (2020). Deep learning approach for forecasting water quality in IoT systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(8), 686–693. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110883>
- Ubina, N. A., Lan, H.-Y., Cheng, S.-C., Chang, C.-C., Lin, S.-S., Zhang, K.-X., Lu, H.-Y., Cheng, C.-Y., & Hsieh, Y.-Z. (2023). Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence *Internet of Things* (AIoT). *Smart Agricultural Technology*, 5, 100285. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, J.-H., Lee, S.-K., Lai, Y.-C., Lin, C.-C., Wang, T.-Y., Lin, Y.-R., Hsu, T.-H., Huang, C.-W., & Chiang, C.-P. (2020). Anomalous behaviors detection for underwater fish using AI techniques. *IEEE Access*, 8, 224372–224382. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043712>
- Yang, C.-T., Chen, H.-W., Chang, E.-J., Kristiani, E., Nguyen, K. L. P., & Chang, J.-S. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126442. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126442>
- Yang, L., Liu, Y., Yu, H., Fang, X., Song, L., Li, D., & Chen, Y. (2021). Computer vision models in intelligent aquaculture with emphasis on fish detection and behavior analysis: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 2785–2816. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09486-2>
- Zhang, Y., Liu, Y., Jiong, Z., Zhang, X., Li, B., & Chen, E. (2021). Development and assessment of blockchain-IoT-based traceability system for frozen aquatic product. *Journal of Food Process Engineering*, 44(5), e13669. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13669>