



Advances in Nanotechnology for Aquaculture: Impacts on Water Quality, Disease Management, Feed Efficiency and Future Perspectives

(Kemajuan Nanoteknologi dalam Akuakultur: Pengaruh terhadap Kualitas Air, Manajemen Penyakit, Efisiensi Pakan, dan Prospek Masa Depan)

Dullah Irwan Latar ^{1✉}, Celcius Waranmaselmbun ¹, Abdul Malik Serang ² dan Diana Yulanda Syahailatua ³

¹ Jurusan Teknologi Perikanan, Prodi Bioteknologi Perikanan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Tual, Indonesia.

² Jurusan Teknologi Sumberdaya Perairan, Prodi Manajemen Rekayasa Budidaya Laut, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Tual, Indonesia.

³ Jurusan Teknologi Sumberdaya Perairan, Prodi Teknologi Budidaya Perikanan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Tual, Indonesia.

Email: irwan.latar@gmail.com

Article Info:

Received: 26 Feb. 2026

Accepted: 14 April 2026

Online: 1 Mei 2026

Article type:

<input type="checkbox"/>	Riview Article
<input type="checkbox"/>	Common Serv. Article
<input checked="" type="checkbox"/>	Research Article

Keyword:

Nanotechnology;
 Aquaculture; Water Quality;
 Disease Management; Feed
 Efficiency.

Corresponding Author:

Dullah Irwan Latar
 Politeknik Perikanan Negeri
 Tual, Tual, Indonesia

Email:

irwan.latar@gmail.com

Abstract

The increasingly intensive development of aquaculture faces various challenges, including declining water quality, rising disease outbreaks, and low feed efficiency that affect productivity and environmental sustainability. Nanotechnology has emerged as a strategic innovation in aquaculture biotechnology that offers solutions through improvements in water quality, disease control, and nutritional optimization. This study aims to analyze the development, effectiveness, and implications of nanotechnology applications in aquaculture using a Systematic Literature Review (SLR) approach. Data sources were obtained from international scientific databases covering the period 2015–2025 through a selection process based on inclusion and exclusion criteria. The synthesis results indicate that nano-encapsulation and nano-antimicrobial applications are the most rapidly developing areas and have significant impacts on improving growth rate, feed conversion ratio (FCR), nutrient bioavailability, and the survival rate of cultured organisms. In addition, nano-adsorbents and nano-biofilters have the potential to improve water quality in intensive farming systems. Nevertheless, most studies are still conducted at the laboratory scale and leave important issues related to toxicity, bioaccumulation, as well as regulatory and biosafety aspects. Therefore, long-term field trials and the development of environmentally friendly nanomaterials are required to support sustainable implementation. Overall, nanotechnology has great prospects for improving the efficiency and sustainability of aquaculture, however its application must be accompanied by a precautionary approach and evidence-based policies.



Copyright©2026, Dullah Irwan Latar, Celcius Waranmaselmbun, Abdul Malik Serang, Diana Yulanda Syahailatua.

I. PENDAHULUAN

Akuakultur merupakan salah satu sektor produksi pangan yang pertumbuhannya paling cepat secara global dan memainkan peran penting

dalam memenuhi kebutuhan protein hewani masyarakat dunia. Intensifikasi budidaya yang semakin tinggi menyebabkan peningkatan tekanan terhadap lingkungan perairan, terutama melalui

akumulasi limbah metabolik, fluktuasi parameter kualitas air, serta meningkatnya risiko penyakit pada organisme budidaya. Ahmad et al. (2021) menunjukkan bahwa pertumbuhan industri akuakultur diiringi dengan meningkatnya tantangan pengelolaan limbah dan kebutuhan teknologi pengolahan yang lebih efektif. Saputro et al. (2025) melaporkan bahwa dinamika kualitas air, khususnya peningkatan amonia dan keberadaan patogen seperti *Vibrio*, berkontribusi terhadap penurunan kesehatan organisme budidaya. Salam et al. (2023) menegaskan bahwa penggunaan antibiotik yang tidak terkendali dalam sistem produksi pangan akuatik berpotensi mempercepat munculnya resistensi antimikroba dan menimbulkan risiko kesehatan global.

Dalam upaya menjawab tantangan tersebut, pendekatan berbasis bioteknologi semakin banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi produksi sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Nanoteknologi muncul sebagai salah satu inovasi yang menjanjikan karena kemampuannya memodifikasi material pada skala nano sehingga memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih reaktif dan spesifik. Biswas et al. (2022) menjelaskan bahwa material nano memiliki luas permukaan tinggi dan kemampuan interaksi biologis yang dapat dimanfaatkan dalam sistem pangan dan lingkungan. Khan et al. (2024) menunjukkan bahwa penerapan nanoteknologi dalam akuakultur berpotensi meningkatkan produktivitas serta mendukung ketahanan pangan. Riyaz et al. (2025) melaporkan bahwa teknologi berbasis nano dapat berfungsi sebagai alat inovatif untuk mendukung akuakultur berkelanjutan melalui peningkatan kesehatan organisme dan efisiensi produksi.

Salah satu permasalahan utama dalam sistem akuakultur intensif adalah penurunan kualitas air akibat akumulasi bahan organik, senyawa nitrogen, dan kontaminan lainnya yang dapat mengganggu fisiologi organisme budidaya. Aragaw et al. (2021) menunjukkan bahwa nanopartikel berbasis besi efektif dalam mengadsorpsi logam berat dan senyawa organik dalam sistem pengolahan air. Iber dan Kasan (2021) melaporkan bahwa teknologi pengelolaan limbah berbasis inovasi mampu menurunkan konsentrasi polutan dalam sistem budidaya udang. García-Rollán et al. (2025) menjelaskan bahwa adsorben berbasis material nano memiliki potensi tinggi dalam meningkatkan efisiensi penghilangan partikel mikro dan kontaminan di lingkungan perairan.

Selain kualitas air, pengendalian penyakit dan peningkatan sistem imun organisme budidaya menjadi aspek krusial dalam menjaga keberhasilan produksi. Wang et al. (2017) melaporkan bahwa nanopartikel memiliki aktivitas antimikroba yang efektif terhadap berbagai patogen melalui mekanisme kerusakan membran sel. Camacho-Jiménez et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan silver nanoparticles mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen pada budidaya udang dan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup. Ahmed et al. (2025) menjelaskan bahwa sistem penghantaran vaksin berbasis nano mampu meningkatkan stabilitas antigen dan respons imun organisme.

Pada aspek nutrisi, efisiensi pemanfaatan pakan menjadi faktor penentu keberhasilan ekonomi dan ekologis dalam akuakultur, karena pakan merupakan komponen biaya terbesar dalam produksi. Arratia-Quijada et al. (2024) menunjukkan bahwa nano-enkapsulasi mampu melindungi probiotik dan meningkatkan bioavailabilitas nutrisi. Haque et al. (2025) melaporkan bahwa kompleks nanonutrien dapat meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pakan pada ikan. Hao et al. (2026) menjelaskan bahwa teknologi nanoenkapsulasi berperan dalam meningkatkan stabilitas dan ketersediaan hayati senyawa nutrasetikal.

Sebagai gambaran perkembangan riset yang ada, beberapa studi telah mengeksplorasi penerapan nanoteknologi dalam berbagai konteks akuakultur. Mahasri et al. (2018) melaporkan bahwa teknologi nanobubble mampu meningkatkan kadar oksigen terlarut dan mendukung pertumbuhan ikan nila. Makabenta et al. (2021) menunjukkan bahwa nanomaterial dapat digunakan sebagai terapi untuk mengatasi infeksi bakteri resisten. Nthunya et al. (2025) menegaskan adanya potensi risiko lingkungan akibat persistensi dan toksisitas nanopartikel di ekosistem.

Penelitian lain juga memberikan bukti tambahan mengenai manfaat dan tantangan penggunaan nanoteknologi dalam sistem produksi akuatik. Bayer (2023) menunjukkan bahwa sistem pelepasan obat berbasis nano memungkinkan pengendalian dosis yang lebih efektif. Mateo dan Jiménez (2022) melaporkan bahwa terapi berbasis nanopartikel perak memiliki potensi dalam melawan bakteri multi-resisten. Pomar-Portillo et al. (2025) menekankan pentingnya pendekatan penilaian keamanan dalam penerapan material

nano agar sesuai dengan prinsip safe and sustainable by design.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi besar nanoteknologi dalam meningkatkan kualitas air, kesehatan organisme, dan efisiensi nutrisi, kajian yang mengintegrasikan seluruh aspek tersebut secara sistematis masih terbatas, khususnya dalam konteks evaluasi komprehensif yang mempertimbangkan efektivitas, risiko lingkungan, dan arah pengembangan masa depan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis sistematis terhadap perkembangan dan dampak penerapan nanoteknologi dalam akuakultur menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR), guna mengidentifikasi tren penelitian, menilai efektivitas aplikasi, serta mengungkap kesenjangan ilmiah yang masih ada. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengembangan teknologi akuakultur yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara sistematis berbagai penelitian mengenai penerapan nanoteknologi dalam akuakultur pada periode 2016–2026. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan proses penelusuran dan seleksi literatur dilakukan secara terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi, sehingga meminimalkan bias dalam pemilihan sumber ilmiah. Proses review mengikuti alur Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), yang mencakup tahap identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi studi akhir.

Sumber literatur diperoleh dari basis data ilmiah internasional, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, yang dipilih karena memiliki cakupan publikasi bereputasi luas di bidang akuakultur, bioteknologi, dan nanoteknologi. Strategi penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean untuk meningkatkan relevansi hasil pencarian, antara lain: (“nanotechnology” AND “aquaculture”), (“nanoparticles” AND “fish disease”), (“nano-feed” OR “nano-encapsulation”), serta (“nano-adsorbent” AND “water quality”). Kata kunci tersebut disesuaikan dengan karakteristik masing-masing basis data guna mengoptimalkan hasil penelusuran.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi artikel ilmiah yang telah melalui proses peer-review, dipublikasikan dalam bahasa Inggris, serta secara langsung membahas aplikasi nanoteknologi dalam sistem akuakultur. Studi yang dipertimbangkan mencakup penelitian eksperimental, uji lapangan, maupun kajian empiris yang menyajikan data kuantitatif atau analisis komprehensif. Sementara itu, artikel non-ilmiah, publikasi yang tidak relevan secara langsung dengan akuakultur, artikel duplikat antar basis data, serta artikel tanpa akses teks lengkap dikeluarkan dari proses seleksi.

Proses seleksi dilakukan secara bertahap dimulai dari identifikasi seluruh artikel yang diperoleh dari hasil pencarian awal, dilanjutkan dengan penghapusan duplikasi, penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, serta evaluasi teks lengkap untuk memastikan kesesuaian dengan kriteria inklusi. Studi yang memenuhi seluruh persyaratan kemudian dianalisis lebih lanjut melalui proses ekstraksi data. Data yang diekstraksi mencakup tahun publikasi, negara asal penelitian, jenis nanopartikel yang digunakan, spesies budidaya, metode aplikasi, serta temuan utama terkait dampak terhadap kualitas air, manajemen penyakit, efisiensi pakan, dan aspek biosafety.

Seluruh data yang diperoleh kemudian disintesis secara naratif-komparatif dengan mengelompokkan hasil penelitian ke dalam empat domain utama aplikasi nanoteknologi dalam akuakultur, yaitu peningkatan kualitas air, pengendalian penyakit, optimalisasi nutrisi dan pakan, serta implikasi lingkungan dan keberlanjutan. Pendekatan sintesis ini memungkinkan identifikasi tren penelitian, tingkat efektivitas aplikasi, serta kesenjangan ilmiah yang masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

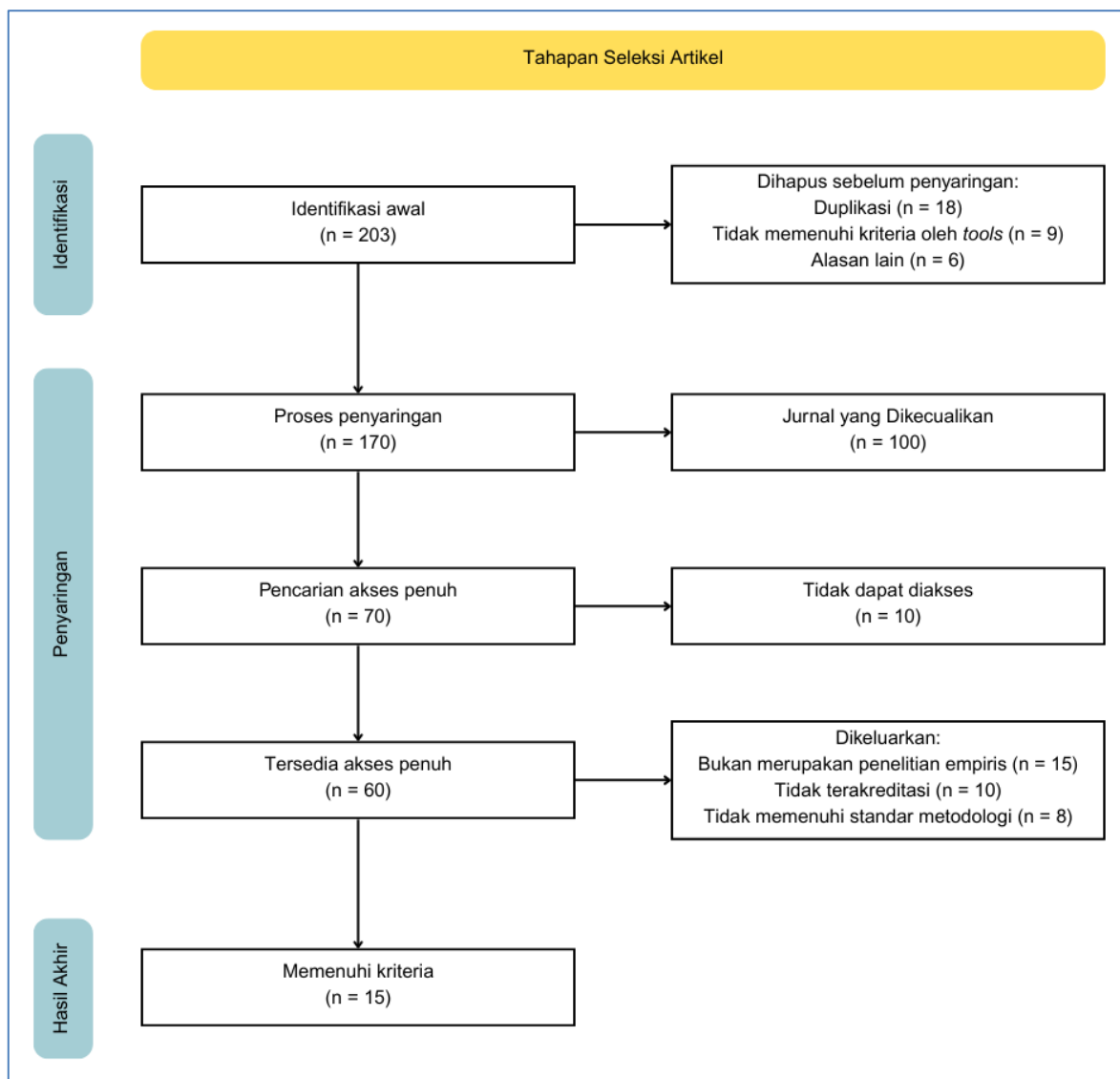
3.1. Hasil

3.1.1. Karakteristik Studi yang Dipilih

Tahap identifikasi awal penelitian ini menghasilkan 203 artikel yang diperoleh dari berbagai basis data ilmiah terkait nanoteknologi dalam akuakultur. Dari jumlah tersebut, dilakukan eliminasi awal sebelum proses penyaringan, yaitu 18 artikel duplikat, 9 artikel yang tidak memenuhi kriteria otomatis oleh tools manajemen referensi, dan 6 artikel lainnya dengan alasan khusus, sehingga tersisa 170 artikel untuk proses penyaringan lebih lanjut. Selanjutnya, dalam tahap

penyaringan, peneliti mengevaluasi relevansi artikel berdasarkan judul dan abstrak, yang menghasilkan 100 artikel dikecualikan karena tidak sesuai fokus penelitian. Dari 70 artikel yang tersedia untuk akses penuh, 10 artikel tidak dapat diakses, sehingga tersisa 60 artikel. Evaluasi lebih mendalam terhadap teks lengkap dilakukan, dan 15 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan

topik, 10 artikel karena tidak terakreditasi, serta 8 artikel karena tidak memenuhi standar metodologi penelitian. Hasil akhirnya, sebanyak 27 artikel memenuhi semua kriteria inklusi dan dijadikan dasar sintesis literatur sistematis. Proses ini digambarkan secara jelas pada Gambar 1, yang menampilkan alur seleksi artikel menggunakan diagram PRISMA.



Gambar 1. Proses seleksi artikel

Tabel 1 memperlihatkan 10 artikel sebagai perwakilan dari hasil seleksi tersebut, sehingga memberikan gambaran jelas mengenai literatur yang dianalisis. Tahapan ini memastikan bahwa literatur yang dianalisis valid, relevan, dan berkualitas, sehingga dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan nanoteknologi dalam akuakultur.

3.1.2. Penerapan Nanoteknologi untuk Peningkatan Kualitas Air

Sebagian besar studi yang dianalisis menunjukkan bahwa nanopartikel memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap berbagai kontaminan dalam sistem budidaya, termasuk logam berat, amonia, serta senyawa organik berbahaya (Aragaw et al., 2021). Nano-adsorben berbasis zeolit dan karbon aktif nano dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi filtrasi secara signifikan dibandingkan metode konvensional, terutama karena memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dan tingkat reaktivitas yang lebih tinggi (Sanjeev et al.,

2025). Karakteristik ini memungkinkan proses penyerapan polutan berlangsung lebih cepat dan lebih efektif, sehingga membantu menjaga stabilitas parameter kualitas air pada sistem budidaya intensif yang padat tebar. Dengan

demikian, pemanfaatan material nano berpotensi menjadi solusi inovatif dalam mengatasi akumulasi limbah metabolik dan sisa pakan yang selama ini menjadi sumber utama degradasi lingkungan budidaya (Saxena et al., 2025).

Tabel 1. Artikel yang Lolos Seleksi

No	Penulis & Tahun	Fokus Studi	Temuan Utama
1	Aragaw, T. A., Bogale, F. M., & Aragaw, B. A. (2021)	Penggunaan nanopartikel besi dalam pengolahan limbah	Menjelaskan metode sintesis, mekanisme adsorpsi logam berat dan senyawa organik, aplikasi nano-adsorbent untuk kualitas air
2	Mahasri, G., et al. (2018)	Sistem akuakultur menggunakan nanobubble untuk oksigen terlarut	Nano-bubble meningkatkan kadar oksigen terlarut dan efisiensi pertumbuhan Nile tilapia
3	Riyaz, R., Iqbal, G., Gargotra, P., et al. (2025)	Aplikasi nanoteknologi untuk akuakultur dan obat ikan	Nano-antimicrobials dan nano-feed meningkatkan kesehatan ikan, efisiensi pakan, serta respon imun
4	Camacho-Jiménez, L., Álvarez-Sánchez, A. R., & Mejía-Ruiz, C. H. (2020)	Silver nanoparticles pada budidaya udang laut	AgNP efektif menghambat bakteri patogen dan meningkatkan survival rate udang
5	Saleh, M., El-Moghazy, A., Elgohary, A. H., Saber, W. I. A., & Helmy, Y. A. (2025)	Nanovaksin untuk imunisasi	Nano-vaccine delivery meningkatkan respon imun dan memungkinkan pelepasan obat terkendali
6	Arratia-Quijada, J., Nuño, K., Ruíz-Santoyo, V., & Andrade-Espinoza, B. A. (2024)	Nano-encapsulation probiotik	Melindungi probiotik dari degradasi pencernaan awal, meningkatkan bioavailabilitas nutrisi
7	Haq, M. A., et al. (2025)	Nanonutrient kompleks pada lele Asia	Meningkatkan pertumbuhan, FCR lebih rendah, dan hematobiokimia lebih optimal
8	Nthunya, L. N., et al. (2025)	Persistensi dan toksisitas nanopartikel	Menunjukkan risiko bioakumulasi, transport, dan efek toksik jangka panjang pada ekosistem
9	Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024)	Nanoteknologi dalam akuakultur dan keamanan pangan	Menunjukkan potensi nanoteknologi meningkatkan efisiensi produksi dan keamanan pangan
10	Pomar-Portillo, V., et al. (2025)	Penilaian keamanan bahan nano lanjutan	Menekankan pentingnya analisis risiko dan pendekatan safe & sustainable by design (SSbD)

Selain berperan sebagai agen adsorpsi, nanopartikel juga dilaporkan mampu mengontrol konsentrasi amonia, menurunkan tingkat kekeruhan air, serta meningkatkan kadar oksigen terlarut melalui pengembangan sistem nano-oxygen carrier (Mahasri et al., 2018). Sejumlah penelitian eksperimental menunjukkan adanya perbaikan signifikan pada parameter kualitas air, khususnya pada tambak udang dan keramba jaring apung yang rentan terhadap fluktuasi lingkungan. Peningkatan kualitas air tersebut berdampak langsung pada stabilitas fisiologis organisme budidaya dan penurunan tingkat mortalitas. Meskipun demikian, efektivitas jangka panjang, stabilitas material nano dalam kolom air, serta potensi akumulasi residu di lingkungan perairan masih memerlukan penelitian lanjutan guna

memastikan keamanan dan keberlanjutan penerapannya dalam skala komersial.

3.1.3. Penerapan Nanoteknologi dalam Pencegahan dan Pengobatan Penyakit

Aplikasi nanoteknologi dalam manajemen penyakit pada akuakultur menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam satu dekade terakhir (Riyaz et al., 2025). Berbagai jenis nanopartikel, seperti silver nanoparticles dan chitosan nanoparticles, telah banyak dimanfaatkan sebagai agen antimikroba alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik konvensional (Wang et al., 2017). Pendekatan ini menjadi semakin relevan mengingat meningkatnya kekhawatiran global terhadap resistensi antimikroba dan residu antibiotik pada produk perikanan. Karakteristik unik nanopartikel, seperti

ukuran yang sangat kecil dan luas permukaan yang tinggi, memungkinkan interaksi langsung dengan membran sel mikroorganisme patogen sehingga meningkatkan efektivitas penghambatan pertumbuhan bakteri (Makabenta et al., 2021).

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa nano-antimikroba efektif melawan berbagai bakteri patogen, termasuk *Vibrio* spp., yang sering menjadi penyebab utama penyakit pada ikan dan udang budidaya (Camacho-Jiménez et al., 2020). Selain itu, temuan Saleh et al. (2025) menjelaskan bahwa sistem penghantaran vaksin berbasis nano (nano-vaccine delivery systems) mampu meningkatkan respons imun non-spesifik dan spesifik pada ikan melalui mekanisme peningkatan stabilitas dan bioavailabilitas antigen. Teknologi nano-enkapsulasi juga memungkinkan pelepasan obat secara terkendali (controlled release), sehingga meningkatkan efisiensi terapi dan mengurangi frekuensi pemberian obat (Bayer, 2023). Beberapa penelitian melaporkan peningkatan tingkat kelangsungan hidup (survival rate) sebesar 20–40% dibandingkan kelompok kontrol tanpa perlakuan nano. Meskipun demikian, terdapat kekhawatiran terkait potensi toksisitas nanopartikel tertentu apabila digunakan dalam konsentrasi tinggi atau dalam jangka waktu panjang, sehingga diperlukan evaluasi keamanan yang lebih komprehensif sebelum penerapan skala luas.

3.14. Pakan Berbasis Nano dan Efisiensi Nutrisi

Pada sektor nutrisi, teknologi nano-enkapsulasi menjadi pendekatan yang paling dominan dalam pengembangan pakan akuakultur berbasis nanoteknologi. Teknologi ini memungkinkan perlindungan zat aktif seperti vitamin, enzim, probiotik, dan mineral dari degradasi selama proses penyimpanan maupun pencernaan awal di saluran gastrointestinal (Arratia-Quijada et al., 2024). Dengan ukuran partikel yang sangat kecil dan kemampuan penetrasi yang tinggi, sistem nano-enkapsulasi mampu meningkatkan stabilitas serta ketersediaan hayati (bioavailability) nutrisi sehingga penyerapan oleh organisme budidaya menjadi lebih optimal (Stojanova et al., 2025). Pendekatan ini secara langsung menjawab permasalahan rendahnya efisiensi pemanfaatan pakan yang selama ini menjadi salah satu faktor utama tingginya biaya produksi dan akumulasi limbah organik dalam perairan budidaya.

Hasil penelitian Haque et al. (2025), menunjukkan bahwa penggunaan nano-feed

berkontribusi terhadap peningkatan bioavailabilitas nutrisi, penurunan Feed Conversion Ratio (FCR), peningkatan laju pertumbuhan spesifik (Specific Growth Rate/SGR), serta efisiensi penyerapan mineral mikro. Beberapa studi pada ikan laut dan udang melaporkan peningkatan pertumbuhan antara 10–25% dibandingkan dengan pakan konvensional. Selain itu, penggunaan nano-probiotik dan nano-immunostimulan dalam formulasi pakan juga terbukti meningkatkan respons imun dan ketahanan terhadap penyakit. Temuan ini menunjukkan bahwa pakan berbasis nano memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi biologis sekaligus efisiensi ekonomi sistem budidaya, khususnya pada sistem intensif dengan tingkat konversi pakan yang tinggi (Haque et al., 2025).

3.1.5. Pertimbangan Lingkungan dan Biosafety

Meskipun manfaat nanoteknologi dalam akuakultur cukup menjanjikan, sejumlah studi menyoroti potensi risiko terhadap lingkungan dan keamanan hayati. Isu utama yang muncul meliputi kemungkinan bioakumulasi nanopartikel dalam jaringan organisme budidaya, potensi toksisitas kronis akibat paparan jangka panjang, serta dampak terhadap mikroorganisme non-target yang berperan penting dalam keseimbangan ekosistem perairan. Karakteristik nanopartikel yang reaktif dan berukuran sangat kecil memungkinkan interaksi yang kompleks dengan komponen biotik dan abiotik lingkungan, sehingga risiko ekologis tidak dapat diabaikan (Nthunya et al., 2025).

Selain aspek biologis, keterbatasan regulasi terkait penggunaan material nano dalam sektor perikanan juga menjadi tantangan signifikan. Hingga saat ini, standar keamanan dan ambang batas residu nanopartikel dalam produk perikanan masih belum terdefinisi secara jelas di banyak negara. Sebagian besar penelitian yang dianalisis masih berada pada skala laboratorium dengan durasi percobaan relatif singkat, sehingga data mengenai dampak jangka panjang pada ekosistem terbuka masih terbatas. Oleh karena itu, penerapan prinsip kehati-hatian (precautionary principle), evaluasi risiko komprehensif, serta pengembangan nanopartikel berbasis bahan ramah lingkungan menjadi langkah penting sebelum implementasi dalam skala komersial yang lebih luas (Martin et al., 2023).

3.1.6. Ringkasan Temuan Utama

Berdasarkan sintesis literatur yang dianalisis, dapat disimpulkan bahwa aplikasi nanoteknologi yang paling berkembang dalam akuakultur adalah pakan berbasis nano (nano-feed) dan nano-antimikroba untuk pengendalian penyakit. Peningkatan performa budidaya paling signifikan ditemukan pada aspek nutrisi dan imunostimulasi, yang secara langsung berdampak pada pertumbuhan, efisiensi konversi pakan, dan tingkat kelangsungan hidup organisme budidaya. Namun demikian, risiko lingkungan dan isu biosafety masih menjadi perhatian utama dalam pengembangan teknologi ini. Selain itu, penelitian jangka panjang dan uji lapangan berskala komersial masih terbatas, sehingga diperlukan kajian lanjutan untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan implementasi nanoteknologi dalam sistem akuakultur modern.

3.2. Pembahasan

Sintesis literatur dalam rentang 2016–2026 menunjukkan bahwa efektivitas nanoteknologi dalam akuakultur tidak bersifat seragam, melainkan sangat bergantung pada domain aplikasinya serta konteks sistem budidaya yang digunakan. Pada pengelolaan kualitas air, nanopartikel bekerja terutama melalui mekanisme fisik-kimia seperti adsorpsi selektif, reaksi oksidasi-reduksi, fotokatalisis, dan filtrasi berbasis permukaan luas spesifik yang tinggi (García-Rollán et al., 2025). Menurut Iber dan Kasan (2021), nano-adsorbents dan nano-biofilters dilaporkan mampu menurunkan konsentrasi amonia, nitrit, serta beberapa logam berat pada sistem resirkulasi dan budidaya intensif. Namun demikian, performa tersebut sangat dipengaruhi oleh stabilitas koloid nanopartikel, potensi aglomerasi dalam kolom air, interaksi dengan bahan organik terlarut, serta kebutuhan regenerasi media filtrasi. Faktor-faktor ini berdampak langsung pada biaya operasional dan efisiensi jangka panjang. Oleh karena itu, walaupun secara eksperimental menjanjikan, aplikasi pada kualitas air masih memerlukan evaluasi komprehensif yang mencakup analisis teknis, ekonomi, dan dampak ekologis sebelum dapat direkomendasikan sebagai solusi standar industri.

Sebaliknya, pada manajemen penyakit dan nutrisi, kontribusi nanoteknologi cenderung lebih nyata dan konsisten. Nano-antimikroba seperti silver nanoparticles dan chitosan nanoparticles menunjukkan aktivitas terhadap berbagai bakteri patogen akuatik, termasuk *Vibrio* spp., dengan

mekanisme yang melibatkan kerusakan membran sel, gangguan sistem enzimatik, dan peningkatan stres oksidatif pada patogen (Mateo & Jiménez, 2022). Di sisi lain, sistem penghantaran vaksin dan imunostimulan berbasis nano meningkatkan efisiensi presentasi antigen serta respons imun humoral dan seluler pada ikan dan udang (Ahmed et al., 2025). Dampaknya tercermin pada peningkatan survival rate dan ketahanan terhadap infeksi eksperimental. Pada sektor nutrisi, teknologi nano-enkapsulasi memungkinkan perlindungan zat aktif seperti vitamin, enzim, probiotik, dan mineral dari degradasi awal di saluran pencernaan, serta memungkinkan pelepasan terkontrol sesuai kondisi fisiologis (Hao et al., 2026). Berbagai studi melaporkan peningkatan bioavailabilitas nutrisi, penurunan Feed Conversion Ratio (FCR), serta kenaikan laju pertumbuhan spesifik (SGR). Keuntungan biologis yang langsung terhadap organisme budidaya inilah yang menjelaskan dominasi riset pada nano-feed dan nano-immunostimulant dibandingkan aplikasi berbasis kualitas air.

Meskipun tren publikasi meningkat signifikan, mayoritas penelitian masih berada pada tahap laboratorium atau uji terkontrol berskala kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat kesiapan teknologi atau Technological Readiness Level (TRL) nanoteknologi dalam akuakultur umumnya masih pada kategori menengah (Khan et al., 2024). Beberapa produk nano-feed mulai memasuki tahap komersialisasi terbatas, khususnya pada sistem budidaya intensif di Asia, tetapi aplikasi seperti nano-sensor kualitas air dan nano-filtrasi cerdas masih jarang dilaporkan dalam skala industri. Hambatan utama peningkatan TRL meliputi biaya sintesis nanopartikel yang relatif tinggi, tantangan standarisasi ukuran dan stabilitas partikel, minimnya pedoman regulasi internasional yang spesifik untuk nano-material perikanan, serta keterbatasan data keamanan jangka panjang (Pomar-Portillo et al., 2025). Tanpa kerangka regulasi yang jelas, adopsi teknologi berpotensi menghadapi resistensi pasar dan ketidakpastian hukum.

Dari perspektif ilmiah, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, sebagian besar studi hanya mengevaluasi satu jenis nanopartikel pada satu spesies tertentu, sehingga generalisasi hasil masih terbatas, terutama untuk komoditas laut tropis. Kedua, durasi penelitian umumnya singkat, berkisar 30–60 hari, sehingga dampak kronis, potensi bioakumulasi, dan efek lintas generasi belum dipahami secara memadai.

Ketiga, studi integratif yang menggabungkan nanoteknologi dengan pendekatan precision aquaculture masih minim. Padahal, integrasi nano-sensor dengan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) berpotensi menghasilkan pengambilan keputusan real-time berbasis data kualitas air, kesehatan ikan, dan efisiensi pakan. Tren terbaru menunjukkan peningkatan minat terhadap green-synthesized nanoparticles berbasis bahan alami, nano-carriers biodegradable, serta nano-probiotics, yang mencerminkan pergeseran orientasi dari sekadar peningkatan performa produksi menuju pendekatan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Protik et al., 2025).

Isu keberlanjutan dan biosafety menjadi dimensi krusial dalam evaluasi jangka panjang. Beberapa penelitian menunjukkan kemungkinan bioakumulasi nanopartikel dalam jaringan ikan, yang secara teoritis dapat memasuki rantai makanan manusia. Selain itu, interaksi nanopartikel dengan mikroorganisme non-target di perairan dapat mengganggu keseimbangan komunitas mikroba yang berperan penting dalam siklus nitrogen dan dekomposisi bahan organik (Ahmed et al., 2023). Ketidakpastian mengenai persistensi dan transformasi nanopartikel di lingkungan perairan terbuka menuntut pendekatan berbasis analisis risiko yang ketat. Penerapan prinsip kehati-hatian (precautionary principle) menjadi relevan, terutama di negara berkembang yang belum memiliki regulasi spesifik terkait nano-material dalam sektor perikanan.

Dalam konteks akuakultur tropis, termasuk Indonesia bagian timur, potensi implementasi nanoteknologi cukup signifikan (Khan et al., 2024). Komoditas seperti kakap, kerapu, dan udang yang dibudidayakan dalam sistem laut terbuka rentan terhadap fluktuasi kualitas air dan tekanan penyakit. Passeri et al. (2025) menemukan bahwa nano-encapsulated feed berpotensi mengurangi kehilangan nutrisi dan limbah pakan yang selama ini menjadi sumber pencemaran pesisir, sementara pengembangan nano-sensor dapat meningkatkan akurasi monitoring parameter kritis seperti amonia, oksigen terlarut, dan pH. Namun, implementasi di wilayah seperti Maluku memerlukan analisis kelayakan ekonomi yang mempertimbangkan skala usaha kecil, kesiapan infrastruktur, serta akses terhadap teknologi. Transfer pengetahuan kepada pembudidaya, uji lapangan dalam kondisi tropis nyata, serta dukungan regulasi berbasis bukti ilmiah menjadi prasyarat agar inovasi tidak hanya berhenti pada level eksperimental.

Secara keseluruhan, hasil SLR ini menegaskan bahwa nanoteknologi menawarkan solusi inovatif terhadap tantangan utama akuakultur modern, khususnya pada aspek nutrisi dan kesehatan organisme budidaya yang menunjukkan dampak paling signifikan dan konsisten. Namun, keberhasilan adopsi jangka panjang akan sangat ditentukan oleh keseimbangan antara efektivitas biologis, kelayakan ekonomi, keamanan lingkungan, serta kesiapan regulasi. Tanpa integrasi keempat aspek tersebut, potensi nanoteknologi berisiko tidak terealisasi secara optimal dalam sistem produksi akuakultur yang berkelanjutan.

IV. PENUTUP

Tinjauan literatur sistematis ini menunjukkan bahwa nanoteknologi telah berkembang menjadi inovasi strategis dalam bidang akuakultur, dengan aplikasi utama pada peningkatan kualitas air, manajemen penyakit, dan efisiensi pakan. Sintesis terhadap publikasi periode 2015–2025 memperlihatkan tren peningkatan signifikan dalam penelitian, khususnya pada pengembangan nano-enkapsulasi dan nano-antimikroba sebagai solusi terhadap tantangan produksi budidaya intensif.

Di antara berbagai domain aplikasi, teknologi nano berbasis pakan dan imunostimulan menunjukkan dampak paling konsisten terhadap peningkatan performa budidaya, termasuk peningkatan laju pertumbuhan, efisiensi konversi pakan (FCR), bioavailabilitas nutrisi, serta tingkat kelangsungan hidup organisme budidaya. Pendekatan ini berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik konvensional sekaligus menekan limbah pakan yang berdampak pada pencemaran perairan.

Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berada pada skala laboratorium dan uji coba jangka pendek. Isu terkait biosafety, potensi bioakumulasi nanopartikel, toksisitas kronis, serta dampak terhadap organisme non-target masih menjadi perhatian utama. Keterbatasan regulasi dan standar keamanan penggunaan material nano dalam sektor akuakultur juga menjadi tantangan dalam implementasi skala luas.

Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada uji lapangan jangka panjang, evaluasi risiko lingkungan secara komprehensif, pengembangan nanopartikel berbasis bahan ramah lingkungan (green synthesis), serta integrasi dengan sistem akuakultur presisi berbasis sensor dan Internet of Things (IoT). Bagi wilayah akuakultur tropis,

termasuk Indonesia bagian timur, nanoteknologi memiliki potensi besar untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan, namun penerapannya harus didukung oleh analisis kelayakan ekonomi, kajian risiko, dan kebijakan berbasis bukti ilmiah. Secara keseluruhan, nanoteknologi merupakan frontier inovasi dalam

bioteknologi akuakultur yang menjanjikan, tetapi implementasinya harus dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan produktivitas dan keberlanjutan lingkungan.

REFERENSI

- Ahmad, A., Sheikh Abdullah, S. R., Abu Hasan, H., Othman, A. R., & Ismail, N. 'I. (2021). Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management*, 287, 112271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>
- Ahmed, A., He, P., He, P., Wu, Y., He, Y., & Munir, S. (2023). Environmental effect of agriculture-related manufactured nano-objects on soil microbial communities. *Environment International*, 173, 107819. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107819>
- Ahmed, S., Gozal, D., & Khalyfa, A. (2025). Nano-based vaccine delivery systems: Innovative therapeutics against cancer and neurological disorders. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(21), 10316. <https://doi.org/10.3390/ijms262110316>
- Aragaw, T. A., Bogale, F. M., & Aragaw, B. A. (2021). Iron-based nanoparticles in wastewater treatment: A review on synthesis methods, applications, and removal mechanisms. *Saudi Journal of Chemistry Society*, 25(8), 101280. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101280>
- Arratia-Quijada, J., Nuño, K., Ruiz-Santoyo, V., & Andrade-Espinoza, B. A. (2024). Nano-encapsulation of probiotics: Need and critical considerations to design new non-dairy probiotic products. *Journal of Functional Foods*, 116, 106192. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106192>
- Bayer, I. S. (2023). Controlled drug release from nanoengineered polysaccharides. *Pharmaceutics*, 15(5), 1364. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15051364>
- Biswas, R., Alam, M., Sarkar, A., Haque, M. I., Hasan, M. M., & Hoque, M. (2022). Application of nanotechnology in food: Processing, preservation, packaging and safety assessment. *Heliyon*, 8(11), e11795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11795>
- Camacho-Jiménez, L., Álvarez-Sánchez, A. R., & Mejía-Ruiz, C. H. (2020). Silver nanoparticles (AgNPs) as antimicrobials in marine shrimp farming: A review. *Aquaculture Reports*, 18, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100512>
- García-Rollán, M., Sanz-Santos, E., Belver, C., & Bedia, J. (2025). Key adsorbents and influencing factors in the adsorption of micro- and nanoplastics: A review. *Journal of Environmental Management*, 383, 125394. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125394>
- Hao, M., Tan, X., Liu, K., & Xin, N. (2026). Nanoencapsulation of nutraceuticals: Enhancing stability and bioavailability in functional foods. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1746176. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1746176>
- Haque, M. A., Jewel, M. A. S., Akter, N., Akter, S., Barman, A. C., Nurul Amin, S. M., Arai, T., Albeshr, M. F., Ngah, N., & Hossain, M. B. (2025). Impact of nanonutrient complex on growth performance, feed efficiency, and hematobiochemical profiles in Asian catfish, *Clarias batrachus*. *Aquaculture Nutrition*, 2025, 7382715. <https://doi.org/10.1155/anu/7382715>
- Haque, M. A., Jewel, M. A. S., Akter, N., Akter, S., Barman, A. C., Nurul Amin, S. M., Arai, T., Albeshr, M. F., Ngah, N., & Hossain, M. B. (2025). Impact of nanonutrient complex on growth performance, feed efficiency, and hematobiochemical profiles in Asian catfish, *Clarias batrachus*. *Aquaculture Nutrition*, 2025, 7382715. <https://doi.org/10.1155/anu/7382715>
- Iber, B. T., & Kasan, N. A. (2021). Recent advances in shrimp aquaculture wastewater management. *Heliyon*, 7(11), e08283. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08283>
- Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024). Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101974>

- Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024). Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101974>
- Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024). Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101974>
- Mahasri, G., et al. (2018). Development of an aquaculture system using nanobubble technology for the optimization of dissolved oxygen in culture media for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 137, 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/137/1/012046>
- Makabenta, J. M. V., Nabawy, A., Li, C. H., Schmidt-Malan, S., Patel, R., & Rotello, V. M. (2021). Nanomaterial-based therapeutics for antibiotic-resistant bacterial infections. *Nature Reviews Microbiology*, 19(1), 23–36. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0420-1>
- Martin, C., Nourian, A., Babaie, M., & Nasr, G. G. (2023). Environmental, health and safety assessment of nanoparticle application in drilling mud: Review. *Geoenvironment Science and Engineering*, 226, 211767. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211767>
- Mateo, E. M., & Jiménez, M. (2022). Silver nanoparticle-based therapy: Can it be useful to combat multi-drug resistant bacteria? *Antibiotics*, 11(9), 1205. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11091205>
- Nthunya, L. N., Mosai, A. K., López-Maldonado, E. A., Bopape, M., Dhibar, S., Nuapia, Y., Ajiboye, T. O., Buledi, J. A., Solangi, A. R., Sherazi, S. T. H., Ndungu, P. N., Mahlangu, O. T., & Mamba, B. B. (2025). Unseen threats in aquatic and terrestrial ecosystems: Nanoparticle persistence, transport and toxicity in natural environments. *Chemosphere*, 382, 144470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144470>
- Passeri, D., Atanasio, P., Proietti, A., Mancini, C., Cognigni, F., La Penna, G., Buccini, L., Rossi, M., Turco, A. C., D'Amato, M., Sorbo, A., Dinarelli, S., D'Ettore, G., & Aureli, F. (2025). Analytical methods for nanomaterials investigation in food and food-related materials. *Applied Food Research*, 5(1), 100675. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100675>
- Pomar-Portillo, V., Suarez-Merino, B., Aparicio, S., Badetti, E., Boyles, M., Brunelli, A., Fito-López, C., Garmendia-Aguirre, I., Giubilato, E., Katsumiti, A., Laurini, E., Lofty, M., Marson, D., Pizzol, L., Rodríguez-Llopis, I., Rumbo, C., Scott-Fordsmand, J. J., Stone, V., Trabucco, S., ... Nowack, B. (2025). Methods and tools for the safety assessment part of the European Commission's safe and sustainable by design framework when applied to advanced materials. *Environment International*, 205, 109904. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109904>
- Protik, T. I., Ridoy, M. N., Sazid, M. G., & Supto, S. T. J. (2025). Advances of green synthesized nanomaterials in different industries. *Materials Proceedings*, 25(1), 22. <https://doi.org/10.3390/materproc2025025022>
- Riyaz, R., Iqbal, G., Gargotra, P., et al. (2025). Interventions of nanotechnology-based applications as a novel tool for sustainable aquaculture and fish medicines. *Blue Biotechnology*, 2, 12. <https://doi.org/10.1186/s44315-025-00034-w>
- Salam, M. A., Al-Amin, M. Y., Salam, M. T., Pawar, J. S., Akhter, N., Rabaan, A. A., & Alqumber, M. A. A. (2023). Antimicrobial resistance: A growing serious threat for global public health. *Healthcare*, 11(13), 1946. <https://doi.org/10.3390/healthcare11131946>
- Saleh, M., El-Moghazy, A., Elgohary, A. H., Saber, W. I. A., & Helmy, Y. A. (2025). Revolutionizing nanovaccines: A new era of immunization. *Vaccines*, 13(2), 126. <https://doi.org/10.3390/vaccines13020126>
- Sanjeev, N. O., Vallabha, M. S., & Rabi, R. R. L. (2025). Nanotechnology-based approaches for the removal of microplastics from wastewater: A comprehensive review. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 16, 1607–1632. <https://doi.org/10.3762/bjnano.16.114>
- Saputro, N. A. D., Suprakto, B., & Aonullah, A. A. (2025). Dinamika kualitas air dan kelimpahan *Vibrio* pada pemeliharaan udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) di hatchery PT Delta Windu Purnama Situbondo. *Aurelia Journal: Authentic Research of Global Fisheries Application Journal*, 7(2), 159–174.
- Saxena, S., Moharil, M. P., Jadhav, P. V., Ghodake, B., Deshmukh, R., & Ingle, A. P. (2025). Transforming waste into wealth: Leveraging nanotechnology for recycling agricultural byproducts into value-added products. *Plant Nano Biology*, 11, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100127>

- Stojanova, M., Demiri, S., Stojanova, M. T., Djukic, D. A., & Kaya, Y. (2025). From cultivation to consumption: Evaluating the effects of nano fertilizers on food quality and safety. *Advanced Agrochem*, 4(3), 217–234. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2025.07.001>
- Wang, L., Hu, C., & Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1227–1249. <https://doi.org/10.2147/IJN.S121956>