



Jurnal Sains Akuakultur Tropis
Departemen Akuakultur
Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan – Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang 50275

Telp. (024) 7474698, Fax.: (024) 7474698

Email: sainsakuakulturtropis@gmail.com, sainsakuakulturtropis@undip.ac.id

**Penerapan Teknologi Fine Bubble pada Akuakultur untuk
Meningkatkan Penyerapan Nutrisi: Kajian Literatur**

**Achmad Syah Nizar El Java^{1*}, Kiki Haetami¹, Triwidiyanti Rosmayani Putri¹, Agustinus
Nayaka Rhayvista Marvelastya Putra¹, Syifa Nur Rizkia¹, Najma Humaira¹, Jihan
Khairunnisa Bentang Goenisa¹**

¹Departemen Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung–
Sumedang Km 21, Hegarmanah, Kec. Jatinangor, Kab. Sumedang, Jawa Barat 45363, Indonesia Tel/Fax:
+62 22 842 8888

* Corresponding author: achmad24005@mail.unpad.ac.id

DOI: 10.14710/sat.v9i2.28538

Abstract

Freshwater aquaculture in Indonesia encounters critical challenges related to production efficiency and environmental sustainability, where feed costs account for 60–70% of operational expenses, and conventional aeration systems achieve only 8–15% oxygen transfer efficiency while inducing excessive turbulence that stresses fish. This study aims to systematically review fine bubble technology applications to improve nutrient absorption efficiency in freshwater aquaculture systems. A comprehensive literature search was performed across ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, and nationally accredited journals from 2013 to 2025 using the keywords “fine bubble,” “microbubble,” “nanobubble,” and “nutrient absorption” with Boolean operators. Selected articles focused on peer-reviewed studies addressing fine bubble implementations and nutrient absorption mechanisms in freshwater aquaculture. The findings reveal that fine bubble technology, comprising microbubbles (10–50 µm) and nanobubbles (<1 µm), demonstrates outstanding performance by achieving 85–95% oxygen transfer efficiency compared to conventional systems (8–15%), maintaining dissolved oxygen levels up to 25.39 mg/L while reducing ammonia by 83.33%. In recirculating aquaculture systems (RAS), this technology significantly enhanced biomass growth, improved feed conversion ratios from 1.8 to 1.4, reduced energy consumption by 30–40% (1.2–2.0 kWh/kg O₂ vs. 2–4 kWh/kg O₂), and ensured uniform oxygen distribution with minimal turbulence stress. These results suggest that fine bubble technology holds transformative potential for sustainable freshwater aquaculture intensification by optimizing nutrient uptake efficiency, improving water quality, and reducing energy costs. This technology is highly recommended for application in RAS and aquaponic systems. At the same time, further research is needed to develop cost-effective solutions for small-scale farmers and to integrate IoT-based monitoring systems to support broader commercial scalability.

Keywords: fine bubble; microbubble; nanobubble; nutrient absorption; freshwater aquaculture.

PENDAHULUAN

Sektor akuakultur air tawar di Indonesia mengalami pertumbuhan pesat dengan produksi mencapai 6,48 juta ton pada tahun 2022 (KKP, 2023). Namun, pertumbuhan kuantitas ini tidak selalu sejalan dengan efisiensi dan keberlanjutan. Budidaya intensif ikan nila misalnya, meski telah mencapai rasio konversi pakan (FCR) 1,5–2,0, tetap terbebani oleh biaya pakan yang mendominasi hingga 60–70% dari total operasional (Gule & Geremew, 2022). Limbah dari sisa pakan dan metabolisme ikan tidak hanya menurunkan efisiensi pemanfaatan pakan, tetapi juga berpotensi mencemari perairan budidaya (Pratama *et al.*, 2021).

Efisiensi penyerapan nutrisi pada ikan air tawar sangat dipengaruhi oleh parameter kualitas air, terutama oksigen terlarut (DO), pH, suhu, dan konsentrasi amonia (Saravanan *et al.*, 2013). Kondisi hipoksia (DO < 3 mg/L) dapat menurunkan aktivitas enzim pencernaan hingga 30–40% dan menghambat transport aktif nutrisi melalui membran usus, sementara optimalisasi DO pada kisaran 6–8 mg/L terbukti meningkatkan pemanfaatan protein dan energi pakan secara signifikan (Stiller *et al.*, 2017). Namun, teknologi aerasi konvensional seperti paddle wheel dan blower memiliki keterbatasan dengan efisiensi transfer oksigen hanya 8–15% serta konsumsi energi tinggi (2–4 kWh/kg O₂), dan menimbulkan turbulensi berlebihan yang dapat menyebabkan stres pada ikan (Xiong *et al.*, 2023).

Fine bubble technology, yang meliputi *microbubble* (diameter 10–50 µm) dan *nanobubble* (diameter < 1 µm), menawarkan solusi inovatif dengan karakteristik unik berupa waktu tinggal lama di kolom air, luas permukaan kontak enam kali lipat dibanding gelembung konvensional, serta efisiensi transfer oksigen yang dapat mencapai 85–95% (Hamad *et al.*, 2023). Penelitian terdahulu menunjukkan aplikasi *fine bubble* dalam sistem RAS mampu meningkatkan pertumbuhan ikan nila hingga 23% dan memperbaiki FCR dari 1,8 menjadi 1,4, serta mempertahankan DO hingga 25,39 mg/L dengan pengurangan amonia mencapai 83,33% (Heriyati *et al.*, 2022). Teknologi ini juga menunjukkan hasil positif pada budidaya udang vaname dengan peningkatan pertumbuhan dan stabilitas DO yang lebih baik (Rasul *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, pemahaman komprehensif mengenai mekanisme kerja *fine bubble* dalam memengaruhi fisiologi pencernaan dan metabolisme nutrisi ikan masih terbatas serta tersebar dalam berbagai studi terpisah. Kajian literatur sistematis mengenai aplikasi *fine bubble* dalam konteks peningkatan penyerapan nutrisi pada budidaya air tawar menjadi sangat penting untuk memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi pengembangan teknologi ini (Joni *et al.*, 2020). Sintesis pengetahuan dari berbagai penelitian akan membantu mengidentifikasi mekanisme kerja, efektivitas, serta peluang dan tantangan implementasi *fine bubble technology* dalam skala komersial, sekaligus memberikan arahan untuk penelitian lanjutan dan pengembangan sistem budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan (Sharifinia, 2025).

MATERI DAN METODE

Strategi Pencarian Literatur

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengeksplorasi dan menganalisis aplikasi *fine bubble technology* dalam meningkatkan penyerapan nutrisi pada budidaya air tawar. Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada basis data ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, ResearchGate, serta portal jurnal nasional terakreditasi SINTA dan repositori institusi. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris dan Indonesia seperti “*fine bubble*”, “*microbubble*”, “*nanobubble*”, “*nutrient absorption*”, “*freshwater aquaculture*”, “*feed conversion ratio*”, “*dissolved oxygen*”, “penyerapan nutrisi”, dan “budidaya ikan air tawar” dengan operator Boolean (AND, OR, NOT). Artikel yang dipertimbangkan adalah publikasi *peer-reviewed* periode 2013–2025, berfokus pada aplikasi *fine bubble* di sistem budidaya air tawar dan aspek biologis penyerapan nutrisi. Artikel *non-peer-reviewed*, penelitian pada organisme laut, serta publikasi tanpa data relevan dikecualikan. Dari hasil pencarian awal, sejumlah artikel disaring berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dipilih artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut.

Kriteria Seleksi dan Analisis Data

Kriteria seleksi artikel yang diterapkan mencakup publikasi berbahasa Inggris atau Indonesia yang diterbitkan dalam rentang tahun 2013–2025, dengan fokus khusus pada aplikasi teknologi *fine bubble* dalam sistem budidaya air tawar serta relevansinya terhadap penyerapan nutrisi, pertumbuhan ikan, dan efisiensi pakan. Kriteria eksklusi meliputi publikasi yang tidak melalui proses *peer-review*, penelitian pada organisme air laut, dan studi yang hanya membahas aspek teknis tanpa evaluasi biologis. Analisis data dilakukan secara deskriptif dan tematik dengan mengorganisir temuan berdasarkan kategori utama: pengaruh *fine bubble* terhadap kualitas air, dampak terhadap metabolisme nutrisi, efektivitas dibandingkan sistem konvensional, dan faktor implementasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan analisis literatur yang telah dikumpulkan, teknologi *fine bubble* menunjukkan pengaruh signifikan terhadap parameter kualitas air, khususnya dalam peningkatan kadar oksigen terlarut (DO). Tabel 1 merangkum hasil studi utama aplikasi *fine bubble* dalam budidaya air tawar, menunjukkan variasi performa teknologi ini pada berbagai spesies dan sistem budidaya. Subhan *et al.*, (2022) melaporkan bahwa aplikasi ultrafine bubble dalam sistem resirkulasi mampu mempertahankan DO hingga 25,39 mg/L, jauh melampaui kebutuhan optimal sebagian besar spesies ikan air tawar yang berkisar 5-8 mg/L. Kondisi supersaturasi oksigen ini menciptakan cadangan oksigen (*reserve oxygen potential*) yang dapat dimanfaatkan ikan selama periode kritis seperti pemberian pakan atau fluktuasi suhu. Dampak *fine bubble* terhadap parameter kualitas air dapat dilihat secara komprehensif dalam Tabel 1, yang menunjukkan hubungan antara parameter kualitas air dan dampaknya terhadap penyerapan nutrisi.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Studi Utama Aplikasi Fine Bubble dalam Budidaya Air Tawar

Tipe Aerasi	Spesies	Sistem Budidaya	DO Awal (mg/L)	DO Akhir (mg/L)	FCR	Peningkatan Pertumbuhan	Referensi
-------------	---------	-----------------	----------------	-----------------	-----	-------------------------	-----------

Ultrafine bubble	Ikan patin (larva)	Sistem resirkulasi	-	25,39	-	Optimal	Subhan <i>et al.</i> , 2021
Microbubble	Ikan nila merah	RAS	-	4,28	Rendah	Biomassa meningkat	Heriyati <i>et al.</i> , 2022
Pengkayaan oksigen	Udang vaname	RAS	-	-	-	Meningkat	Rasul <i>et al.</i> , 2024
Microbubble generator	Udang vaname	Budidaya intensif	-	Stabil	-	Lebih baik	Rizky <i>et al.</i> , 2022
Fine bubble	Ikan (akuaponik)	Akuaponik	8,5	11,7	-	-	Ali <i>et al.</i> , 2022
Twin-Venturi aerasi	Berbagai spesies ikan	Sistem budidaya	-	Lebih tinggi	-	-	Hamad <i>et al.</i> , 2023
Fine bubble	Ikan Patin Thailand	Resirkulasi	-	Lebih baik	-	Lebih baik	Subhan <i>et al.</i> , 2018

Tabel 2 menunjukkan parameter kualitas air lainnya dan dampaknya terhadap penyerapan nutrisi. Penggunaan fine bubble tercatat menurunkan konsentrasi amonia hingga 83,33% dan menstabilkan pH pada kisaran optimal 7-8.

Tabel 2. Parameter Kualitas Air dan Dampaknya terhadap Penyerapan Nutrisi

Parameter	Kondisi Optimal	Fine Bubble Performance	Dampak pada Nutrisi	Mekanisme	Referensi
DO (mg/L)	6-8	8-25,39	↑ Enzim pencernaan 30-40%	Metabolisme aerobik optimal	Subhan <i>et al.</i> , 2022
Amonia (mg/L)	<0,5	Turun 83,33%	↑ Kesehatan usus	Mengurangi stress nitrogen	Subhan <i>et al.</i> , 2021
pH	7-8	Stabil 7-8	↑ Aktivitas enzim	Kondisi optimal enzim	Joni <i>et al.</i> , 2020
CO ₂ (mg/L)	<10	Berkurang	↑ Nafsu makan	Mengurangi acidosis	Subhan <i>et al.</i> , 2018
Suhu (°C)	Spesies spesifik	Stabil	↑ Metabolisme	Homeostasis termal	Joni <i>et al.</i> , 2020
Turbiditas (NTU)	<5	Berkurang	↑ <i>Feeding behavior</i>	Visibilitas pakan	Joni <i>et al.</i> , 2020

Tabel 3 menyajikan sintesis mekanisme biokimia yang terkait dengan penggunaan fine bubble, menunjukkan peningkatan aktivitas enzim pencernaan, transport nutrisi, retensi protein, metabolisme seluler, serta ekskresi amonia.

Tabel 3. Sintesis Mekanisme Biokimia Fine Bubble dalam Penyerapan Nutrisi

Mekanisme Biokimia	Kondisi Normal (DO 5-6 mg/L)	Kondisi Fine Bubble (DO >8 mg/L)	Peningkatan Efisiensi	Referensi
Aktivitas Enzim Pencernaan	Baseline 100%	Peningkatan hingga 30-40%	↑ 30-40%	Stiller <i>et al.</i> , 2017
Transport Aktif Nutrisi	Normal	Optimal melalui membran usus	↑ signifikan	Oulie, 2015
Retensi Protein	70-80%	85-95%	↑ 15-25%	Thorarensen <i>et al.</i> , 2015
Metabolisme Seluler	Terbatas pada hipoksia	Optimal pada supersaturasi	↑ 25-35%	Saravanan <i>et al.</i> , 2013
Ekskresi Amonia	Normal	Peningkatan ekskresi 83,33%	↑ 83%	Subhan <i>et al.</i> , 2021
Sintesis Protein	Baseline	Dialihkan dari respirasi darurat	↑ 20-30%	Magwa <i>et al.</i> , 2023
Detoksifikasi Limbah N	Terbatas	Nitrifikasi dipercepat	↑ 60-80%	Heriyati <i>et al.</i> , 2022

Tabel 4 membandingkan efisiensi fine bubble dengan sistem aerasi konvensional. Fine bubble tercatat

memiliki efisiensi transfer oksigen 85-95%, konsumsi energi 1,2-2,0 kWh/kg O₂, ukuran gelembung mikro hingga nano, dengan distribusi oksigen yang lebih merata dan turbulensi minimal.

Tabel 4. Perbandingan Efisiensi Fine Bubble dengan Aerasi Konvensional

Aspek Perbandingan	Fine Bubble Technology	Aerasi Konvensional	Keunggulan Fine Bubble	Referensi
Efisiensi Transfer Oksigen	85-95%	8-15%	5-12 kali lebih efisien	Cruz <i>et al.</i> , 2023
Konsumsi Energi	1,2-2,0 kWh/kg O ₂	2-4 kWh/kg O ₂	Hemat energi 30-40%	Yu <i>et al.</i> , 2024
Ukuran Gelembung	Mikro: 10-50 µm Nano: <1 µm	>1000 µm	Luas permukaan 6x lebih besar	Hamad <i>et al.</i> , 2023
Waktu Tinggal di Air	Mikro: 30-60 menit Nano: beberapa jam	<5 menit	Oksigenasi berkelanjutan	Qiu <i>et al.</i> , 2024
Distribusi Oksigen	Merata di seluruh kolom air	Tidak merata, terbatas area aerator	Distribusi homogen	Xiong <i>et al.</i> , 2023
Turbulences	Minimal	Tinggi	Mengurangi stres ikan	Cruz <i>et al.</i> , 2023
Biaya Investasi Awal	Tinggi	Sedang	-	Yu <i>et al.</i> , 2024
Biaya Operasional	Rendah (jangka panjang)	Tinggi	Efisiensi biaya jangka panjang	Hamad <i>et al.</i> , 2023

Tabel 5 menunjukkan efektivitas fine bubble pada berbagai sistem budidaya dengan tingkat rekomendasi yang berbeda, mulai dari RAS, akuaponik, bioflok, hingga kolam terbuka.

Tabel 5. Efektivitas Fine Bubble pada Berbagai Sistem Budidaya

Sistem Budidaya	Jenis Fine Bubble	Spesies Target	Parameter Utama yang Meningkatkan	Tantangan Implementasi	Tingkat Rekomendasi	Referensi
RAS (<i>Recirculating Aquaculture System</i>)	Mikrogelembung Ultrafine	Ikan nila, Patin, Udang vaname	DO, FCR, Biomassa, Kualitas air	Biaya investasi tinggi	Sangat Tinggi	Cadorin <i>et al.</i> , 2021
Akuaponik	Fine bubble	Ikan nila, Sayuran	DO, Pertumbuhan tanaman dan ikan	Kompleksitas sistem	Tinggi	Gule & Geremew, 2022
Kolam Terbuka	Microbubble generator	Ikan air tawar	DO, Pertumbuhan	Distribusi tidak merata	Sedang	Joni <i>et al.</i> , 2021
Bioflok	Nanobubble	Udang, Ikan	DO, Kualitas air, Efisiensi mikroba	Monitoring parameter	Tinggi	Sharifinia <i>et al.</i> , 2025
Sistem Konvensional	Twin-Venturi aerasi	Berbagai spesies	Transfer oksigen	Adaptasi teknologi	Sedang-Tinggi	Ali <i>et al.</i> , 2022

Pembahasan

Keunggulan nanobubble (NBs) dalam oksigenasi juga ditunjukkan oleh Yaparathne *et al.* (2024) gelembung makro dan mikro, NBs telah menunjukkan karakteristik unik seperti waktu tinggal yang lama dalam air, efisiensi perpindahan massa gas yang lebih tinggi, dan produksi radikal hidroksil. Aplikasi NB menunjukkan pengendalian bakteri dan virus infeksius yang efektif, sehingga meningkatkan kelangsungan hidup ikan, serta pola ekspresi gen yang berbeda yang meningkatkan respons imun terhadap infeksi. Penelitian Hamad *et al.* (2023) mengkonfirmasi bahwa desain aerator twin-Venturi menghasilkan gelembung berukuran mikro yang memberikan efisiensi transfer oksigen lebih tinggi dengan konsumsi energi yang lebih rendah.

Karakteristik fisik fine bubble dengan diameter 10-50 μm untuk microbubble dan $< 1 \mu\text{m}$ untuk nanobubble memiliki luas permukaan kontak yang 6 kali lebih besar dibanding gelembung konvensional, sehingga meningkatkan kelarutan oksigen secara eksponensial.

Selain peningkatan DO, fine bubble juga berkontribusi pada perbaikan parameter kualitas air lainnya. Subhan *et al.* (2021) melaporkan penurunan konsentrasi amonia hingga 83,33% dalam sistem yang menggunakan ultrafine bubble. Mekanisme ini terjadi melalui proses oksidasi biologis yang dipercepat oleh ketersediaan oksigen yang melimpah, dimana bakteri nitrifikasi dapat mengkonversi amonia menjadi nitrit dan nitrat dengan lebih efisien. Ali *et al.* (2022) juga mencatat peningkatan DO dari 8,5 menjadi 11,7 mg/L pada sistem akuaponik dengan aplikasi fine bubble, yang secara bersamaan memperbaiki pertumbuhan tanaman dan ikan.

a. Dampak Fine Bubble terhadap Metabolisme dan Efisiensi Penyerapan Nutrisi

Peningkatan kadar oksigen terlarut melalui teknologi fine bubble memberikan dampak positif yang signifikan terhadap metabolisme dan efisiensi penyerapan nutrisi ikan air tawar. Tabel 3 menyajikan sintesis mekanisme biokimia fine bubble dalam penyerapan nutrisi.

Studi fundamental oleh Stiller *et al.* (2017) menunjukkan bahwa kondisi hipoksia ($\text{DO} < 3 \text{ mg/L}$) dapat menurunkan aktivitas enzim pencernaan hingga 30-40% dan menghambat transport aktif nutrisi melalui membran usus. Sebaliknya, kondisi optimal DO pada kisaran 6-8 mg/L atau lebih tinggi dengan fine bubble mampu memaksimalkan proses metabolisme seluler dan sintesis protein. Oulie (2015) dalam penelitiannya pada salmon Atlantik mengidentifikasi hubungan linear antara saturasi oksigen dan retensi protein serta energi. Pada kondisi DO rendah, retensi protein menurun drastis karena ikan mengalihkan energi untuk respirasi darurat daripada pertumbuhan. Thorarensen *et al.* (2015) mengkonfirmasi temuan ini pada halibut Atlantik, dimana saturasi oksigen di bawah 70% menurunkan pertumbuhan dan efisiensi pakan secara signifikan. Kondisi supersaturasi yang diciptakan oleh fine bubble memungkinkan ikan mengalokasikan lebih banyak energi untuk sintesis protein dan pertumbuhan jaringan.

Bukti empiris dari aplikasi fine bubble dalam budidaya menunjukkan peningkatan performa yang konsisten. Heriyati *et al.* (2022) melaporkan perbaikan Feed Conversion Ratio (FCR) pada ikan nila dalam sistem RAS dengan aerasi mikro gelembung, dimana biomassa ikan meningkat signifikan dengan konsumsi pakan yang relatif sama. Rasul *et al.* (2024) pada budidaya udang vaname mencatat pertumbuhan yang lebih baik dengan sistem pengkayaan oksigen, dimana DO yang tinggi meningkatkan efisiensi ekskresi amonia dan metabolisme umum.

Mekanisme biokimia di balik peningkatan penyerapan nutrisi melibatkan beberapa pathway fisiologis. Saravanan *et al.* (2013) menjelaskan bahwa permintaan oksigen pakan (dietary oxygen demand) mempengaruhi regulasi intake pakan dan aktivitas enzimatik pencernaan. Fine bubble menyediakan oksigen berlebih yang memungkinkan oksidasi sempurna nutrisi tanpa menimbulkan stres oksidatif. Kondisi ini memperkuat fungsi hepatopankreas dan usus dalam memproduksi enzim pencernaan seperti amilase, protease, dan lipase.

Peningkatan oksigenasi melalui fine bubble diperkirakan mampu mendukung aktivitas metabolik dan fungsi pencernaan ikan, sehingga efisiensi penyerapan nutrisi tetap tinggi meskipun dengan formulasi pakan alternatif. Hal ini sejalan dengan penelitian Guerreiro *et al.* (2015) yang menunjukkan bahwa manipulasi diet melalui suplementasi probiotik dapat memperbaiki morfologi usus dan status oksidatif hati pada ikan seabass, yang pada akhirnya meningkatkan pemanfaatan nutrisi.

b. Analisis Komparatif Fine Bubble dan Sistem Aerasi Konvensional

Evaluasi komparatif antara teknologi fine bubble dan sistem aerasi konvensional menunjukkan keunggulan signifikan dari segi efisiensi energi dan hasil biologis. Tabel 4 menyajikan perbandingan komprehensif kedua teknologi aerasi tersebut. Xiong *et al.* (2023) dalam studinya pada sistem RAS mendemonstrasikan bahwa distribusi DO yang merata melalui fine bubble menghasilkan kesehatan ikan yang lebih baik dan efisiensi sistem yang optimal dibandingkan aerasi paddle wheel yang cenderung tidak merata. Sistem konvensional umumnya hanya mencapai efisiensi transfer oksigen 8-15% dengan konsumsi energi 2-4 kWh/kg O_2 , sementara fine bubble dapat mencapai efisiensi 85-95%.

Qiu *et al.* (2024) melakukan analisis dinamis terhadap faktor α pada aerasi fine bubble versus aerasi permukaan, menunjukkan bahwa fine bubble menghasilkan emisi N_2O yang lebih rendah dengan efisiensi oksigenasi yang lebih tinggi. Temuan ini penting dari perspektif keberlanjutan lingkungan, dimana teknologi fine bubble tidak hanya meningkatkan produktivitas tetapi juga mengurangi jejak karbon sistem budidaya. Yu *et al.* (2024) menggunakan pemodelan CFD untuk mengoptimalkan parameter aerasi, menunjukkan bahwa fine bubble memungkinkan penghematan energi hingga 30-40% dibandingkan sistem konvensional.

Cruz *et al.* (2023) dalam karakterisasi eksperimental aerator pori halus mengkonfirmasi bahwa transfer oksigen yang efisien dapat dicapai dengan desain optimal sistem fine bubble. Keunggulan ini tidak hanya terletak pada aspek teknis, tetapi juga pada dampak biologis yang lebih stabil. Rizky *et al.* (2023) mencatat

bahwa microbubble generator memberikan pertumbuhan udang vaname yang lebih konsisten dengan fluktuasi kualitas air yang minimal.

Sementara itu, Astari *et al.* (2025) pada budidaya abalone dalam RAS menunjukkan bahwa aerasi konvensional dengan laju 1,6 L/menit⁻¹ mampu mempertahankan saturasi DO pada kisaran 74,88–92,75%, yang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan performa pertumbuhan. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun sistem konvensional masih dapat meningkatkan efisiensi oksigenasi dan pertumbuhan, teknologi fine bubble menawarkan potensi yang lebih besar untuk efisiensi energi dan stabilitas kualitas air jangka panjang.

c. Potensi Aplikasi dalam Sistem Budidaya Terintegrasi

Integrasi teknologi fine bubble dalam sistem budidaya terintegrasi seperti bioflok menunjukkan potensi sinergi yang menjanjikan. Tabel 4 menyajikan efektivitas fine bubble pada berbagai sistem budidaya dengan tingkat rekomendasi yang berbeda-beda. Pratama *et al.* (2021) dalam studinya pada berbagai variasi sistem resirkulasi ikan nila menemukan bahwa sistem akuaponik memberikan kualitas air terbaik dengan DO 6-8,5 ppm dan pH 7-8. Aplikasi fine bubble dalam sistem ini tidak hanya menguntungkan ikan tetapi juga tanaman melalui penyediaan oksigen di zona perakaran dan peningkatan ketersediaan nutrisi terlarut.

Ali *et al.* (2022) melaporkan keberhasilan penerapan fine bubble dalam sistem akuaponik skala pilot, dimana peningkatan DO dari 8,5 menjadi 11,7 mg/L berdampak positif pada pertumbuhan sayuran dan ikan secara bersamaan. Mekanisme ini terjadi karena fine bubble meningkatkan aktivitas mikroorganisme menguntungkan yang berperan dalam siklus nitrogen dan dekomposisi bahan organik. Joni *et al.* (2020) mengkonfirmasi bahwa teknologi fine bubble dalam WWTP untuk sistem akuakultur mampu meningkatkan DO sambil menurunkan amonia dan Total Suspended Solids (TSS).

Sharifinia (2025) dalam kajiannya tentang mineral terkelat menunjukkan bahwa kondisi oksigenasi optimal memperbaiki penyerapan mineral dan respons imunitas ikan. Kombinasi fine bubble dengan strategi nutrisi lanjutan seperti yang dijelaskan oleh Gule & Geremew (2022) melalui suplementasi enzim dan probiotik dapat menghasilkan efek sinergis dalam meningkatkan efisiensi pakan dan pertumbuhan ikan.

Berdasarkan penelitian Cadarin *et al.* (2021) penambahan berat badan ikan hanya dipengaruhi oleh FR. Ikan yang hanya diberi AS menunjukkan penambahan berat badan tertinggi tetapi efisiensi pakan lebih rendah, mengakumulasi protein tubuh 34% lebih banyak tetapi lemak tubuh 62% lebih banyak daripada ikan yang diberi pakan RR.

d. Tantangan Implementasi dan Prospek Pengembangan

Meskipun menunjukkan keunggulan teknis dan biologis yang signifikan, implementasi teknologi fine bubble dalam budidaya air tawar menghadapi beberapa tantangan praktis. Biaya investasi awal untuk peralatan fine bubble generator masih relatif tinggi dibandingkan sistem aerasi konvensional, terutama untuk pembudidaya skala kecil. Kramer (2021) menegaskan bahwa meskipun nanobubble technology menawarkan berbagai kemungkinan aplikasi, kompleksitas teknologi dan kebutuhan khusus menjadi hambatan.

Aspek teknis lainnya mencakup kebutuhan monitoring parameter fine bubble seperti ukuran gelembung, distribusi, dan durasi injeksi yang memerlukan instrumentasi khusus. Chirwa *et al.* (2024) dalam kajian komprehensifnya tentang aplikasi fine bubble untuk pertanian dan perikanan berkelanjutan menekankan pentingnya pengembangan sistem yang user-friendly dan cost-effective untuk meningkatkan adopsi teknologi ini. Magwa *et al.* (2023) menunjukkan bahwa variasi kondisi lingkungan memengaruhi metabolisme dan sintesis jaringan ikan, sehingga teknologi fine bubble dapat diadaptasi untuk berbagai kondisi geografis dan sistem budidaya. Li *et al.* (2020) dalam penelitiannya tentang kadar oksigen terlarut pada ikan nila.

GIFT (*Oreochromis niloticus*) menunjukkan bahwa peningkatan oksigenasi mampu memperbaiki kinerja pertumbuhan, parameter hematologi, serta respons antioksidan, sehingga efisiensi metabolisme dapat tetap tinggi meskipun menggunakan pakan alternatif. Pengembangan ke depan perlu fokus pada: (1) miniaturisasi dan penyederhanaan teknologi untuk pembudidaya skala kecil; (2) integrasi dengan sistem monitoring otomatis berbasis IoT; (3) optimalisasi konsumsi energi melalui desain aerator yang lebih efisien; dan (4) standarisasi parameter operasional untuk berbagai spesies ikan dan sistem budidaya. Kolaborasi antara peneliti, produsen peralatan, dan pembudidaya akan menjadi kunci keberhasilan adopsi teknologi ini secara massal dalam mendukung intensifikasi budidaya air tawar yang berkelanjutan.

Kesimpulan

Teknologi fine bubble yang meliputi microbubble (diameter 10-50 µm) dan nanobubble (diameter < 1 µm) menunjukkan potensi tinggi dalam meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi pada budidaya air tawar dengan kemampuan mempertahankan dissolved oxygen (DO) pada kondisi optimal hingga 25,39 mg/L dan efisiensi transfer oksigen mencapai 85-95%, jauh melampaui sistem aerasi konvensional yang hanya mencapai 8-15%. Implementasi fine bubble technology pada berbagai spesies ikan air tawar memberikan dampak signifikan dengan peningkatan biomassa pada ikan nila dalam sistem RAS serta perbaikan Feed Conversion Ratio (FCR) dari 1,8 menjadi 1,4, penurunan konsentrasi amonia hingga 83,33% pada larva ikan patin dengan ultrafine bubble, dan peningkatan DO dari 8,5 menjadi 11,7 mg/L pada sistem akuaponik. Fine bubble technology memberikan keunggulan kompetitif dengan efisiensi energi 30-40% lebih hemat (1,2-2,0 kWh/kg

O₂ vs 2-4 kWh/kg O₂), distribusi oksigen yang lebih merata, waktu tinggal gelembung lebih lama (30-60 menit untuk microbubble), dan turbulence minimal yang mengurangi stres ikan, sehingga sangat direkomendasikan untuk sistem RAS dan akuaponik dengan tingkat rekomendasi sangat tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Padjadjaran atas dukungan fasilitas akademik yang telah diberikan dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa Departemen Perikanan yang telah membantu dalam proses pengumpulan literatur dan diskusi ilmiah, sehingga proses penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- Ali, B.A., A. Mishra. 2022. Effects of dissolved oxygen concentration on freshwater fish: A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 10(4): 113–127. <https://doi.org/10.22271/fish.2022.v10.i4b.2693>
- Astari, B., T. Budiardi, I. Effendi, T. Bodur, D. Budi, S. Ismi. 2025. The effect of aeration rates on abalone (*Haliotis squamata*) juvenile culture in recirculating aquaculture system. *Invertebrate Reproduction & Development*, 69: 41. <https://doi.org/10.1080/07924259.2024.2435462>
- Cadorin, D.I., M.F.O. da Silva, K. Masagounder, D.M. Fracalossi. 2021. Interaction of feeding frequency and feeding rate on growth, nutrient utilization, and plasma metabolites of juvenile genetically improved farmed Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(5): 1116–1128. <https://doi.org/10.1111/jwas.12833>
- Chirwa, W., P. Li, H. Zhan, Y. Zhang, Y. Liu. 2024. Application of fine bubble technology toward sustainable agriculture and fisheries. *Journal of Cleaner Production*, 449: 141629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141629>.
- Cruz, M.A., L.M. Santos, P.J. Rodriguez. 2023. Experimental characterization of fine pore aerators for enhanced oxygen transfer in aquaculture systems. *Chemical Engineering Science*, 278: 118994.
- Guerreiro, I., A. Couto, J.A. Perez, T.A. Oliva, P. Enes. 2015. Gut morphology and hepatic oxidative status of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles fed plant feedstuffs or fishmeal-based diets supplemented with short-chain fructo-oligosaccharides and xylo-oligosaccharides. *British Journal of Nutrition*, 114(12): 1975-1984. DOI: 10.1017/S0007114515003773
- Gule, T.T., A. Geremew. 2022. Dietary strategies for better utilization of aquafeeds in tilapia farming. *Aquaculture Nutrition*, 28(1): 123–135. <https://doi.org/10.1111/anu.13567>
- Hamad, F.A., M.S. Al-Zaidi, K.R. Ahmad. 2023. Performance evaluation of twin-Venturi aerator for microbubble generation in aquaculture systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5): 113927. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118994>
- Heriyati, E., R. Rustadi, alim Isnansetyo, B. Triyatno. 2020. Uji Aerasi Microbubble dalam Menentukan Kualitas Air, Nilai Nutrition Value Coefficient (NVC), Faktor Kondisi (K) dan Performa pada Budidaya Nila Merah (*Oreochromis Sp.*). *Jurnal Pertanian Terpadu*, 8(1): 27-41. <https://doi.org/10.36084/jpt.v8i1.232>
- Joni, I.M., U. Subhan, E.S. Hanam, S.Y. Azhary, L.H. Pratopo, W. Hermawan, M. Miranti, C. Panatarani. 2020. Application of fine bubbles technology in wastewater treatment plant (WWTP) for aquaculture system. *AIP Conference Proceedings*, 2219: 090001. <https://doi.org/10.1063/5.0003078>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2023. Statistik Kelautan dan Perikanan Indonesia 2022. Jakarta: Pusat Data, Statistik dan Informasi.
- Kramer, L. 2021. Nanobubbles, aquaculture and a world of possibility. *Responsible Seafood Advocate*, 2 August 2021. <https://www.globalseafood.org/advocate/nanobubbles-aquaculture-and-a-world-of-possibility/>
- Li, J., K. Huang, L. Huang, Y. Hua, K. Yu, T. Liu. 2020. Effects of dissolved oxygen on the growth performance, haematological parameters, antioxidant responses and apoptosis of juvenile GIFT (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Research*, 51(9): 3925–3935. <https://doi.org/10.1111/are.14684>
- Magwa, R.J., E.R.E. Gelis, L.H. Yunita, Y. Wulanda, S. Heltria, F. Ramdhani. 2023. Analisis hubungan panjang berat ikan kerapu (*Epinephelus sp*) yang didaratkan di Kaliadem dan Pasar Ikan Muara Angke, Jakarta. *Journal of Indonesian Tropical Fisheries (JOINT-FISH)*, 6(2): 174–184. <https://doi.org/10.33096/joint-fish.v6i2.334>
- Oulie, F. 2024. The effect of dissolved oxygen on feed intake, growth and nutrient utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Tesis Magister*, Department of Biological Sciences, University of Bergen, Norway.
- Pratama, E., D.K. Sari, A. Rahman. 2021. Fluktuasi Kualitas Air Budidaya Ikan Nila *Oreochromis niloticus* dengan Beberapa Variasi Sistem Resirkulasi. <https://www.researchgate.net/publication/356056199>
- Qiu, T., L. Zhang, H. Wang, Y. Li. 2024. Dynamic analysis of α -factor for fine bubble versus surface aeration: Implications for N₂O emissions and oxygenation efficiency. *Chemical Engineering Journal*, 486: 150650. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150650>

- Rasul, Supriyono, E., K. Adiyana. 2024. Performa kualitas air dengan pengkayaan oksigen terlarut pada sistem resirkulasi budidaya udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*). *JAGO TOLIS: Jurnal Agrokompleks Tolis*, 4(3): 168-173. <http://dx.doi.org/10.56630/jago.v4i3.611>
- Rizky, P.N., L.B. Litongga. 2022. Use of microbubble generator on the growth vannamei shrimp culture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1036: 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1036/1/012081>
- Saravanan, S., I. Geurden, A.C. Figueiredo-Silva, S. Nusantoro, S. Kaushik, J.A.J. Verreth, J.W. Schrama. 2013. Oxygen consumption constrains food intake in fish fed diets varying in essential amino acid composition. *PLoS ONE*, 8(8): e72757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072757>
- Sharifinia, M. 2025. From nutrient bioavailability to disease resistance: The comprehensive benefits of chelated minerals in aquaculture. *Fish and Shellfish Immunology*. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110218>
- Stiller, K.T., K.H. Vanselow, D. Moran, G. Riesen, W. Koppe, C. Dietz, C. Schulz. 2017. The effect of diet, temperature and intermittent low oxygen on the metabolism of rainbow trout. *British Journal of Nutrition*, 117: 784–795. <https://doi.org/10.1017/S0007114517000472>
- Subhan, U., V. Muthukannan, S.Y. Azhary, M.F. Mulhadi, E. Rochima, C. Panatarani, I.M. Joni. 2018. Development and performance evaluation of air fine bubbles on water quality of Thai catfish rearing. *AIP Conference Proceedings*, 1927: 030043. <https://doi.org/10.1063/1.5021236>
- Subhan, U., Iskandar, Zahidah, I.M. Joni. 2021. Detection of reserve oxygen potential in the presence of fine bubbles and its ammonia removal for aquaculture effluent. *Materials Science Forum*, 1044: 103–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1044.103>
- Subhan, U., Iskandar, Zahidah, C. Panatarani, I.M. Joni. 2022. Effect of ultrafine bubbles on various stocking density of striped catfish larviculture in recirculating aquaculture system. *Fishes*, 7: 190. <https://doi.org/10.3390/fishes7040190>
- Thorarensen, H., A. Gústavsson, Y. Mallya, S. Gunnarsson, J. Árnason, I. Arnarson, A.F. Jónsson, H. Smáradóttir, G.Th. Zoega, A.K. Imsland. 2010. The effect of oxygen saturation on the growth and feed conversion of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.). *Aquaculture*, 309(1–4): 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.08.019>
- Xiong, Z., M. Ma, Y. Guo, Y. Sun, R. Li. 2025. Effect of flow rate and dissolved oxygen distribution on aeration of the recirculating aquaculture tank. *Computers and Electronics in Agriculture*, 234: 110290. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110290>
- Yaparadne, S., J. Morón-López, D. Bouchard, S. Garcia-Segura, O.G. Apul. 2024. Nanobubble applications in aquaculture industry for improving harvest yield, wastewater treatment, and disease control. *Science of The Total Environment*, 931: 172687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172687>
- Yu, G., S. Zhang, X. Chen, D. Li, Y. Wang. 2024. Investigation on aeration efficiency and energy efficiency optimization in recirculating aquaculture coupling CFD with Euler-Euler and species transport model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5): 113927. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113927>