

Review on Transport Phenomena and Hydrodynamics of Integrated Ultrafiltration and Bubble Diffusers in Aquaculture Recirculation

Baskoro Tri Julianto^{1,2}, Sitti Filzha Fitrya Ginoga³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sukabumi, Indonesia

²Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknik dan Teknologi, IPB University, Indonesia

³Magister Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik dan Teknologi, IPB University, Indonesia

Email: 220701baskoro@ummi.ac.id^{1*}

Received 29 April 2026 | Revised 5 Mei 2026 | Accepted 10 Mei 2026

ABSTRAK

Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) dikembangkan untuk mengatasi penurunan kualitas air akibat intensifikasi budidaya, namun masih terkendala efisiensi aerasi dan membrane fouling. Kajian literatur naratif ini (berbasis 29 referensi) bertujuan menganalisis fenomena transpor dan hidrodinamika pada integrasi membran ultrafiltrasi dan bubble diffuser dalam RAS. Hasil sintesis menunjukkan bahwa penggunaan micro-nanobubble terbukti meningkatkan efisiensi perpindahan massa oksigen melalui perluasan antarmuka gas-cair dan peningkatan residence time. Selain itu, turbulensi dan gaya geser aliran efektif mengurangi pembentukan cake layer dan menekan fouling, didukung oleh Reactive Oxygen Species (ROS) yang mendegradasi biofouling. Karena mayoritas riset masih berfokus pada kualitas air, studi mengenai pemodelan hidrodinamika tiga fase dan model prediktif fouling masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengembangan model matematika dan validasi eksperimental skala pilot untuk mengoptimalkan desain RAS yang berkelanjutan.

Kata kunci: *Fenomena transpor; hidrodinamika; ultrafiltrasi; bubble diffuser; sistem resirkulasi akuakultur.*

ABSTRACT

Recirculating Aquaculture Systems (RAS) were developed to address water quality degradation caused by aquaculture intensification, yet they still face challenges regarding aeration efficiency and membrane fouling. This narrative literature review (based on 29 references) analyzes the transport phenomena and hydrodynamics of integrating ultrafiltration membranes and bubble diffusers in RAS. Synthesized results indicate that micro-nanobubbles enhance oxygen mass transfer efficiency by increasing the gas-liquid interfacial area and residence time. Furthermore, flow turbulence and shear stress effectively reduce cake layer formation and mitigate fouling, supported by Reactive Oxygen Species (ROS) that degrade biofouling. Since current research predominantly focuses on water quality, studies on three-phase hydrodynamic modeling and predictive fouling models remain highly limited. Therefore, future research should focus on developing mathematical models and conducting pilot-scale experimental validation to optimize sustainable RAS designs.

Keywords: *Transport phenomena; hydrodynamics; ultrafiltration; bubble diffuser; aquaculture recirculation system.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki bentang perairan yang sangat luas. Hal ini menyebabkan konsumsi ikan di Indonesia cukup tinggi yaitu sebesar $28,7 \pm 9,8$ kg/kapita/tahun pada tahun 2019. Nilai ini sedikit lebih tinggi daripada rerata global yaitu sebesar 21,0 kg/kapita/tahun [1,2]. Selain pada ikan konsumsi, ikan hias pun tidak dapat luput dari perhatian. Jumlah ikan hias yang diperdagangkan di dunia mencapai 1.600 jenis di mana 750 jenis diantaranya adalah jenis ikan air tawar. Indonesia memiliki pangsa pasar sebesar 9,5% serta dapat memenuhi kebutuhan impor negara Singapura hingga 90% [3]. Hal ini menunjukkan bahwa intensifikasi budidaya perikanan di Indonesia menjadi isu yang cukup penting.

Permasalahan budidaya perikanan khususnya air tawar adalah mengenai kualitas air. Intensifikasi budidaya akibat peningkatan permintaan ikan menyebabkan peningkatan kepadatan tebar dan input pakan, yang pada akhirnya meningkatkan akumulasi limbah metabolik dan memperburuk kualitas air. Sebagai contoh, [4] menyatakan bahwa konsentrasi amonia di atas 0,1 mg/L dapat menyebabkan kerusakan insang secara permanen pada ikan konsumsi khususnya nila dan lele yang berujung pada penghentian pertumbuhan meskipun ikan telah diberi pakan berprotein tinggi. Selain itu, kadar oksigen terlarut yang dijaga stabil lebih besar dari 5,0 mg/L terbukti dapat menurunkan rasio konversi pakan. Pada sisi dari ikan hias, [5] menegaskan bahwa kualitas air yang buruk adalah masalah yang terus terjadi di setiap fase perdagangan ikan hias, mulai dari tahap penangkapan atau budidaya, transit, transportasi hingga tiba di akuarium pembeli. Selain kualitas air, padat tebar dan penanganan yang buruk juga memengaruhi tingkat stres ikan serta merusak lendir pelindung alami ikan. Risiko-risiko ini dapat dengan mudah ditemukan pada sistem budidaya kolam konvensional yang tidak memanfaatkan sistem filtrasi dan aerasi yang baik. Pada sistem kolam konvensional, pengendalian kualitas air sangat bergantung pada proses asimilasi biologis alami oleh komunitas mikroba heterotrof dan fitoplankton. Namun, peningkatan beban nitrogen akibat sisa pakan dan ekskresi metabolik sering kali melampaui daya dukung lingkungan/kapasitas asimilasi kolam. Maka, tanpa adanya sistem filtrasi biologis yang secara spesifik direkayasa untuk menyediakan luas permukaan bagi bakteri nitrifikasi, sistem perairan statis akan selalu berakhir dengan toksisitas mematikan seiring bertambahnya biomassa ikan [6].

Solusi dari permasalahan di atas adalah dengan memanfaatkan teknologi yang terus berkembang guna meningkatkan kualitas air pada sistem budidaya. Sistem konvensional yang cenderung bersifat statis dapat digantikan dengan sistem yang bersifat dinamis seperti sistem resirkulasi akuakultur (*Recirculating Aquaculture System/ RAS*). RAS dapat didefinisikan sebagai sistem budidaya yang mengandalkan integrasi komponen mekanis dan biologis untuk mengolah air limbah dari tangki pemeliharaan sehingga dapat dikembalikan lagi ke kondisi standar kualitas yang aman bagi keberlangsungan hidup ikan. Sistem ini didesain untuk meminimalkan kebutuhan air eksternal serta mengendalikan lingkungan budidaya secara absolut tanpa intervensi cuaca eksternal [7]. Sistem RAS pada beberapa penelitian terbukti memiliki implikasi positif bagi budidaya perikanan. Sebagai contoh, penggunaan RAS pada budidaya Teripang Pasir menunjukkan prestasi yang sangat baik. Tingkat kelulusan hidup pada sistem budidaya yang mengimplementasikan RAS terbukti dapat menghasilkan tingkat sempurna sebesar 100%. Selain itu, RAS juga terbukti dapat menekan jumlah amonia pada air [8]. Pada kasus lain, sistem RAS yang diaplikasikan untuk budidaya ikan koi terbukti dapat menstabilkan suhu air, penyeimbangan pH, meningkatkan kadar oksigen terlarut serta meningkatkan pertumbuhan dan kelulusan hidup hingga 100% [9].

Meskipun RAS mampu menekan kebutuhan pergantian air hingga kurang dari 10% dari total volume sistem dan mempertahankan kualitas lingkungan budidaya, keberhasilan operasionalnya sangat

bergantung pada efisiensi proses pengolahan air di setiap unit pengolahan. Pada sistem dengan padat tebar tinggi, akumulasi padatan tersuspensi, sisa pakan, bahan organik terlarut, serta senyawa nitrogen menyebabkan peningkatan beban biofilter dan mempercepat penurunan kualitas air apabila tidak diimbangi dengan proses filtrasi dan aerasi yang memadai. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi perpindahan massa oksigen, penghilangan padatan halus, serta pengendalian *fouling* menjadi aspek penting dalam pengembangan sistem RAS modern [10].

Salah satu teknologi yang berkembang untuk meningkatkan kualitas pengolahan air pada RAS adalah membran ultrafiltrasi. Teknologi ini mampu memisahkan padatan tersuspensi berukuran halus, mikroorganisme, dan sebagian besar koloid melalui mekanisme penyaringan berbasis ukuran pori sehingga menghasilkan kualitas air yang lebih stabil dibandingkan filtrasi mekanis konvensional. Namun demikian, keberhasilan ultrafiltrasi sangat dipengaruhi oleh fenomena *fouling*, yaitu akumulasi partikel dan biofilm pada permukaan membran yang meningkatkan resistansi hidraulik, menurunkan fluks *permeat*, dan meningkatkan kebutuhan energi maupun frekuensi pembersihan membran. Oleh karena itu, berbagai pendekatan dikembangkan untuk mengurangi *fouling* tanpa meningkatkan konsumsi energi secara signifikan [10].

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penggunaan *bubble diffuser*, khususnya *microbubble* dan *nanobubble diffuser*. Gelembung berukuran mikro hingga nano memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, waktu tinggal di dalam air yang lebih lama, serta efisiensi transfer oksigen yang lebih baik dibandingkan aerasi konvensional. Selain meningkatkan kadar oksigen terlarut, gelembung berukuran kecil juga menghasilkan turbulensi lokal dan gaya geser di sekitar permukaan membran yang berpotensi mengurangi pembentukan *fouling*. Penelitian pada sistem RAS menunjukkan bahwa penggunaan *microbubble* mampu mempertahankan konsentrasi *dissolved oxygen* sekitar 4,28 mg/L hingga akhir pemeliharaan, sekaligus menurunkan konsentrasi karbon dioksida dan amonia dibandingkan sistem aerasi biasa [11].

Meskipun ultrafiltrasi dan *bubble diffuser* telah banyak diteliti secara terpisah, integrasi kedua teknologi tersebut berpotensi menghasilkan sinergi antara proses perpindahan massa, hidrodinamika aliran multi-fase, dan mekanisme pengendalian *fouling*. *Bubble diffuser* tidak hanya berfungsi sebagai sistem aerasi, tetapi juga memengaruhi distribusi kecepatan fluida, tegangan geser pada permukaan membran, serta proses transpor partikel menuju dan menjauhi membran. Dengan demikian, performa sistem tidak lagi hanya ditentukan oleh karakteristik membran atau efisiensi aerasi secara individual, melainkan oleh interaksi kompleks antara fenomena transpor momentum, massa, dan hidrodinamika gelembung di dalam sistem resirkulasi.

Berbagai penelitian sebelumnya umumnya mengevaluasi keberhasilan RAS berdasarkan indikator biologis, seperti pertumbuhan ikan, tingkat kelangsungan hidup, *feed conversion ratio*, maupun kualitas air. Sebaliknya, kajian yang secara khusus mengintegrasikan fenomena transpor, hidrodinamika gelembung, perpindahan massa oksigen, dinamika *fouling* membran, serta parameter rekayasa yang mengendalikan interaksi antara *bubble diffuser* dan ultrafiltrasi masih relatif terbatas dan tersebar pada berbagai disiplin ilmu. Kondisi tersebut menyebabkan belum tersedianya sintesis komprehensif yang dapat menjelaskan mekanisme fundamental yang mendasari peningkatan performa sistem RAS melalui integrasi kedua teknologi tersebut.

2. METODOLOGI

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *narrative literature review* dengan penelusuran literatur secara terarah (*targeted literature search*) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian mengenai fenomena transpor dan hidrodinamika pada integrasi ultrafiltrasi dan *bubble diffuser* dalam sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS). Pendekatan ini dilakukan melalui tahapan identifikasi literatur, seleksi artikel, ekstraksi data, analisis tematik, dan sintesis hasil sehingga proses kajian dapat dilakukan secara sistematis dan transparan.

2.2. Strategi Pencarian Literatur

Penelusuran literatur dilakukan melalui enam basis data ilmiah internasional yaitu *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, *MDPI*, dan *Google Scholar*. Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci. Kata kunci dan strategi penelusuran literatur dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kata Kunci dan Strategi Penelusuran Literatur

Kelompok	Kata Kunci
Sistem/ <i>System</i>	<i>Recirculating Aquaculture System OR RAS</i>
Membran/ <i>Membrane</i>	<i>Ultrafiltration OR membrane filtration</i>
<i>Bubble</i>	<i>Bubble diffuser OR microbubble OR nanobubble</i>
Transpor/ <i>Transport</i>	<i>Transport phenomena</i>
<i>Fouling</i>	<i>Membrane fouling</i>
Hidrodinamika/ <i>Hydrodynamic</i>	<i>Hydrodynamics</i>

2.3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Literatur

Pada tahap ini, artikel yang diperoleh dari proses penelusuran diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memastikan bahwa literatur yang digunakan memiliki relevansi terhadap tujuan penelitian. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal internasional maupun nasional yang telah melalui proses *peer review*; (2) diterbitkan pada rentang tahun 2010-2026 (diutamakan) untuk menggambarkan perkembangan teknologi terkini, dengan tetap mempertimbangkan beberapa referensi klasik yang relevan sebagai landasan teori; (3) membahas satu atau lebih topik mengenai *Recirculating Aquaculture System* (RAS), ultrafiltrasi, *bubble diffuser*, fenomena transpor, hidrodinamika, perpindahan massa, atau *membrane fouling*; (4) tersedia dalam bentuk *full text*; serta (5) ditulis dalam bahasa Inggris atau bahasa Indonesia.

Sebaliknya, artikel dikeluarkan dari proses sintesis apabila memenuhi satu atau lebih kriteria eksklusi, yaitu: (1) berupa editorial, abstrak konferensi, laporan singkat, atau artikel tanpa proses *peer review*; (2) tidak memiliki akses *full text*; (3) hanya membahas aspek biologis budidaya tanpa mengaitkan mekanisme transpor atau hidrodinamika; (4) merupakan artikel duplikat yang diperoleh dari lebih dari satu basis data; serta (5) tidak memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan penelitian.

Kriteria tersebut diterapkan secara konsisten untuk memperoleh kumpulan literatur yang memiliki kualitas ilmiah, relevansi, dan kelengkapan informasi sehingga mampu mendukung proses sintesis secara komprehensif. Secara ringkas, bagian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Literatur

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Jenis publikasi	Artikel jurnal <i>peer-reviewed</i> atau <i>proceeding article</i> yang dapat diakses secara penuh	Editorial, <i>proceeding abstract</i> , <i>book review</i>
Tahun publikasi	Diutamakan 2010-2026 untuk artikel penelitian; buku referensi klasik digunakan sebagai landasan teori atau mendukung pernyataan artikel yang dibahas	Di luar rentang (kecuali referensi teori dasar)
Bahasa	Inggris dan Indonesia	Bahasa lain
Topik	RAS, ultrafiltrasi, <i>bubble diffuser</i> , fenomena transpor, hidrodinamika, <i>fouling</i>	Tidak membahas topik tersebut
Akses	<i>Full text</i> tersedia	<i>Full text</i> tidak tersedia
Relevansi	Mendukung tujuan penelitian	Tidak relevan

2.4. Seleksi Literatur dan Sintesis Data

Literatur yang diperoleh dari proses penelusuran tidak dianalisis secara statistik, tetapi ditelaah secara kritis berdasarkan kesesuaiannya dengan fokus kajian. Seleksi dilakukan melalui pembacaan judul, abstrak, dan isi artikel untuk mengidentifikasi penelitian yang membahas fenomena transpor, hidrodinamika, ultrafiltrasi, *bubble diffuser*, serta penerapannya pada sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS). Artikel yang hanya membahas performa biologis ikan tanpa menjelaskan mekanisme rekayasa yang mendasarinya tidak dijadikan referensi utama dalam sintesis.

Sebanyak 29 referensi yang terdiri atas artikel jurnal, prosiding ilmiah, dan buku referensi digunakan sebagai sumber utama dalam kajian ini. Informasi dari setiap referensi kemudian diekstraksi berdasarkan tujuan penelitian, metode yang digunakan, parameter yang diamati, serta temuan utama yang berkaitan dengan fenomena transpor dan hidrodinamika. Untuk memudahkan proses sintesis, seluruh literatur diklasifikasikan berdasarkan fokus pembahasannya ke dalam beberapa kelompok, yaitu konsep dasar *Recirculating Aquaculture System* (RAS), fenomena transpor, hidrodinamika *bubble diffuser*, ultrafiltrasi dan *membrane fouling*, integrasi *bubble diffuser*-ultrafiltrasi, analisis hidrodinamika, serta parameter rekayasa. Klasifikasi literatur yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Literatur yang Digunakan dalam Kajian

Kelompok Literatur	Fokus Kajian	Contoh Referensi
Sistem RAS	Konsep, konfigurasi dan kualitas air	[7], [10], [12]
Fenomena transpor	Momentum, massa dan perpindahan panas	[14], [15]
<i>Bubble diffuser</i>	Transfer oksigen dan hidrodinamika	[11], [16], [17]
Ultrafiltrasi	Fouling dan filtrasi membran	[19], [20], [21]
Integrasi <i>Bubble-UF</i>	Pengendalian fouling	[21], [22], [28]
CFD/Hidrodinamika	Simulasi aliran	[23], [24]
Engineering parameter	Bilangan tak berdimensi	[29]

Pengelompokan literatur tersebut digunakan untuk menyusun pembahasan secara bertahap, sehingga setiap tema dapat dianalisis secara komprehensif sebelum diintegrasikan untuk mengidentifikasi hubungan antarfenomena serta kesenjangan penelitian (*research gap*).

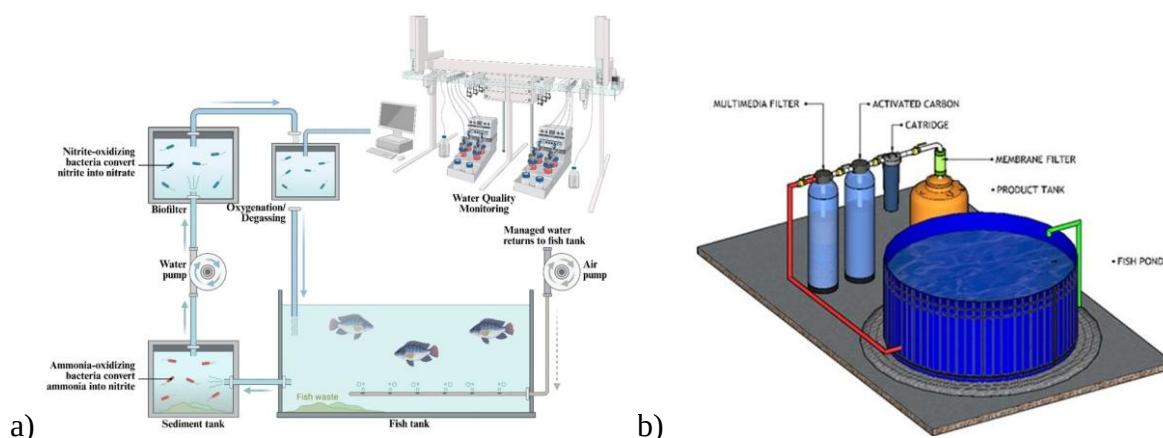
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Konsep Dasar Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS)

Secara umum, sistem resirkulasi akuakultur (*Recirculating Aquaculture System/RAS*) merupakan sistem pengolahan air terintegrasi yang tersusun atas beberapa komponen utama yang saling berinteraksi untuk mempertahankan kualitas lingkungan budidaya. Komponen pertama adalah tangki pemeliharaan (*fish tank* atau *fish pond*), yaitu unit tempat organisme akuatik dibudidayakan yang umumnya dirancang berbentuk melingkar atau oktagonal untuk mengoptimalkan pola aliran air, distribusi oksigen, serta pergerakan limbah menuju sistem penyaringan. Komponen berikutnya adalah unit penyaringan mekanis, seperti tangki sedimentasi atau filter padatan, yang berfungsi memisahkan partikel tersuspensi berupa sisa pakan, feses, dan material organik lain dari aliran air.

Selanjutnya, pompa air berperan sebagai penggerak utama sirkulasi yang mendistribusikan air ke seluruh rangkaian pengolahan dan mengembalikannya kembali ke tangki budidaya. Unit biofiltrasi menjadi komponen biologis yang sangat penting dalam RAS karena berfungsi mengubah amonia ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) yang bersifat toksik menjadi nitrit (NO_2^-) dan selanjutnya menjadi nitrat (NO_3^-) yang relatif lebih aman melalui proses nitrifikasi oleh mikroorganisme. Proses ini secara fundamental melibatkan mekanisme transpor massa, khususnya perpindahan substrat nitrogen dan oksigen menuju permukaan biofilm mikroba.

Selain itu, unit oksigenasi dan *degassing* berfungsi menjaga konsentrasi oksigen terlarut agar tetap optimal untuk mendukung metabolisme ikan dan aktivitas bakteri biofilter, sekaligus mengurangi akumulasi karbon dioksida hasil respirasi. Pada unit ini, perpindahan massa gas-cair menjadi mekanisme utama yang menentukan efisiensi transfer oksigen dan pelepasan gas terlarut dari sistem. Terakhir, unit disinfeksi digunakan untuk mengendalikan patogen dan menjaga biosekuritas sistem budidaya [12]. Dalam pengembangannya, konfigurasi RAS dapat dimodifikasi melalui integrasi unit filtrasi lanjutan, seperti filtrasi multimedia, karbon aktif, maupun membran berteknologi nano untuk meningkatkan efisiensi pengolahan air [13]. Secara visual, konfigurasi umum dan modifikasi sistem RAS disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Resirkulasi Akuakultur, a) Gambar Tipikal RAS b) RAS yang Dimodifikasi dengan Menambahkan Unit Filtrasi Multimedia, Karbon Aktif dan Nano Membran [12,13]

3.2. Dasar Fenomena Transpor pada Sistem Akuakultur

Fenomena transpor merupakan konsep fundamental yang menyatukan prinsip mekanika fluida, perpindahan panas, dan perpindahan massa untuk mendeskripsikan berbagai proses pertukaran

momentum, energi, dan massa di alam semesta. Pada tingkatan yang lebih abstrak, seluruh perpindahan fisik ini pada dasarnya berakar dari pertukaran partikel perantara yang memindahkan informasi mengenai status kuantum antar partikel dasar [14]. Namun, ketika kerangka abstrak ini ditarik ke skala makroskopis dalam lingkungan perairan, fenomena transpor bermanifestasi sebagai mekanisme fisik utama yang mengendalikan dinamika kualitas air melalui prinsip kekekalan massa. Perubahan konsentrasi zat di badan air sangat bergantung pada keseimbangan fluks materi akibat adveksi yang mengangkut polutan secara terorganisir mengikuti arus serta pencampuran turbulen dan difusi yang membaurkan zat secara acak dari area berkonsentrasi tinggi ke rendah. Keseluruhan transpor hidrodinamik ini berfungsi sebagai "kendaraan" yang menggerakkan materi untuk terus berinteraksi dengan proses biokimia ekosistem yang bertindak sebagai sumber (*sources*) penambah atau penyusut (*sinks*) pengurang zat. Dengan demikian, penggabungan prinsip pergerakan massa (mekanika fluida) dan kinetika reaksi ini menjadi fondasi mutlak untuk melacak jejak pencemaran serta memprediksi daya dukung lingkungan [15].

Sebagai kelanjutan dari kerangka konseptual fenomena transpor makroskopis tersebut, RAS merepresentasikan aplikasi rekayasa lingkungan di mana pertukaran momentum, massa, dan energi dimanipulasi secara absolut. Dalam sistem perairan buatan ini, hukum-hukum kekekalan dikendalikan untuk menciptakan reaktor biologis berskala industri yang mampu melampaui daya dukung perairan alami secara eksponensial.

3.3. Hidrodinamika Bubble Diffuser dalam RAS

Hidrodinamika *bubble diffuser* memegang peranan fundamental dalam sistem resirkulasi akuakultur (*Recirculating Aquaculture System*, RAS) karena secara langsung menentukan efisiensi oksigenasi, homogenitas pencampuran, serta kestabilan kualitas air yang mendukung metabolisme organisme budidaya. Dalam sistem ini, udara diinjeksikan melalui diffuser untuk menghasilkan aliran dua fase gas-cair berupa gelembung yang bergerak menuju permukaan akibat gaya apung (*buoyancy force*) dan membentuk *bubble plume* yang menghasilkan sirkulasi vertikal, gradien kecepatan, serta turbulensi lokal. Proses tersebut memperbesar luas antarmuka gas-cair dan mempercepat redistribusi oksigen terlarut di seluruh volume sistem, sehingga mendukung terbentuknya lingkungan budidaya yang lebih homogen. Oleh karena itu, karakteristik hidrodinamika gelembung menjadi faktor utama yang menentukan intensitas perpindahan massa, efektivitas aerasi, dan kestabilan kualitas air pada sistem RAS.

Efektivitas transfer oksigen dalam sistem aerasi berbasis *bubble diffuser* dipengaruhi oleh ukuran gelembung, waktu tinggal (*residence time*), luas permukaan spesifik, dan pola distribusi gelembung di dalam kolom air. Secara teoritis, gelembung berukuran lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih tinggi sehingga memperbesar peluang perpindahan oksigen dari fase gas menuju fase cair. *Nanobubble* berbasis oksigen menghasilkan koefisien transfer massa volumetrik ($k_L a$) yang lebih tinggi dibandingkan *nanobubble* udara, menunjukkan bahwa pengurangan ukuran gelembung meningkatkan efisiensi perpindahan massa melalui perluasan area kontak gas-cair serta peningkatan stabilitas oksigen terlarut di dalam media budidaya [16].

Selain ukuran gelembung, karakteristik fisik mikro-*nanobubble* juga memengaruhi dinamika perpindahan massa dan perilaku aliran di dalam sistem. Mikro-*nanobubble* memiliki tekanan internal tinggi, kestabilan koloid, serta waktu tinggal yang lebih panjang dibandingkan gelembung konvensional [17]. Kondisi tersebut memperpanjang interaksi antara fase gas dan cair sehingga meningkatkan peluang transfer oksigen tanpa menghasilkan tegangan geser yang berlebihan pada organisme budidaya.

Kecepatan naik gelembung yang lebih rendah juga memungkinkan distribusi oksigen terlarut berlangsung lebih merata di seluruh volume sistem, sehingga mengurangi kemungkinan terbentuknya zona dengan defisit oksigen pada sistem budidaya intensif.

Dari perspektif fenomena transpor multifase, pembentukan *bubble plume* tidak hanya berperan dalam proses aerasi tetapi juga menentukan karakteristik pencampuran dan distribusi massa di dalam reaktor. Injeksi gas menghasilkan *dispersed bubble flow* yang mendominasi perpindahan massa, pencampuran, dan performa proses dalam sistem multifase. Distribusi gelembung (*bubble distribution*) dan fraksi rongga gas (*gas void fraction*) menentukan efektivitas homogenisasi kualitas air, distribusi nutrisi, serta kemampuan sistem dalam mengurangi zona stagnan yang berpotensi memperburuk kondisi lingkungan budidaya.

Selain meningkatkan laju perpindahan oksigen, karakteristik *nanobubble* juga memengaruhi kemampuan sistem mempertahankan oksigen terlarut selama proses resirkulasi berlangsung. *Nanobubble* mampu mempertahankan konsentrasi *dissolved oxygen* (DO) lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan aerasi konvensional karena memiliki retensi gas yang lebih baik dan kehilangan oksigen yang lebih rendah [18]. Dengan demikian, integrasi *bubble diffuser* berbasis mikro-*nanobubble* pada sistem RAS tidak hanya meningkatkan efisiensi aerasi, tetapi juga mendukung stabilitas kualitas air dan keberlanjutan operasional sistem budidaya.

3.4. Fenomena Transport pada Ultrafiltrasi

Ultrafiltrasi merupakan proses pemisahan berbasis membran yang bekerja melalui perbedaan tekanan transmembran (*transmembrane pressure*, TMP) untuk memisahkan partikel tersuspensi, senyawa organik, mikroorganisme, dan koloid dari media cair. Dalam perspektif fenomena transpor, proses ini dikendalikan oleh interaksi antara mekanisme konveksi, difusi, dan polarisasi konsentrasi (*concentration polarization*) yang menentukan keseimbangan perpindahan partikel menuju dan menjauhi permukaan membran. Aliran konvektif mendorong partikel ke arah membran akibat gaya tekanan, sedangkan difusi bekerja mengembalikan partikel ke aliran utama akibat gradien konsentrasi. Ketidakseimbangan antara kedua mekanisme tersebut menyebabkan akumulasi material pada permukaan membran yang kemudian berkembang menjadi *fouling*, sehingga meningkatkan hambatan perpindahan massa dan menurunkan fluks *permeat*.

Fenomena *fouling* menjadi salah satu tantangan utama dalam pengoperasian ultrafiltrasi karena secara langsung meningkatkan resistansi hidraulik sistem. Deposisi partikel pada permukaan membran dan penyumbatan pori (*pore blockage*) merupakan mekanisme dominan yang menyebabkan penurunan performa filtrasi [19]. Akumulasi material pada permukaan membran menghasilkan peningkatan resistansi terhadap aliran fluida sehingga tekanan operasi yang lebih tinggi diperlukan untuk mempertahankan kapasitas filtrasi. Selain itu, pembentukan *cake layer* dilaporkan memberikan kontribusi paling dominan terhadap resistansi total dibandingkan mekanisme *fouling* lainnya, sehingga pengendalian pembentukan lapisan *fouling* menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas performa ultrafiltrasi.

Karakteristik *fouling* yang terbentuk juga dipengaruhi oleh kondisi operasi sistem dan sifat suspensi yang diproses. Perubahan kondisi lingkungan operasi dapat memengaruhi struktur dan sifat *fouling* yang terbentuk, di mana lapisan *fouling* yang lebih longgar cenderung lebih mudah dihilangkan melalui pembersihan fisik dibandingkan *fouling* yang bersifat padat dan *irreversible* [20]. Kondisi tersebut

menunjukkan bahwa pengaturan kondisi operasi dapat memengaruhi tingkat reversibilitas *fouling* dan efisiensi pemeliharaan sistem membran.

Selain kondisi operasi, sifat intrinsik membran turut menentukan performa perpindahan massa pada ultrafiltrasi. Peningkatan hidrofilisitas membran mampu menurunkan resistansi hidraulik dan meningkatkan permeabilitas air secara signifikan. Dalam konteks akuakultur intensif, di mana air mengandung protein, sisa pakan, biofilm, dan bahan organik terlarut dalam konsentrasi tinggi, karakteristik material membran menjadi penting untuk mengurangi kecenderungan adhesi partikel dan mempertahankan kestabilan performa filtrasi jangka panjang.

3.5. Integrasi Bubble Diffuser-Ultrafiltrasi

Integrasi *bubble diffuser* dengan ultrafiltrasi menghasilkan hubungan sinergis antara proses aerasi dan pengendalian *fouling* membran melalui mekanisme hidrodinamika dan fenomena transport massa. Pada sistem terintegrasi ini, gelembung udara tidak hanya berfungsi sebagai media suplai oksigen tetapi juga menghasilkan turbulensi lokal dan gaya geser (*shear stress*) di sekitar permukaan membran. Interaksi tersebut membantu menghambat deposisi partikel, mengurangi pembentukan *cake layer*, dan meningkatkan perpindahan balik (*back diffusion*) partikel menuju aliran utama sehingga menurunkan resistansi perpindahan massa di sekitar membran.

Mikro-nanobubble mampu meningkatkan efisiensi pembersihan membran secara signifikan melalui peningkatan turbulensi lokal dan pengurangan ketebalan *boundary layer* pada permukaan membran [21]. Gelembung berukuran kecil menghasilkan distribusi gaya geser yang lebih merata sehingga mampu menekan akumulasi material *fouling* dan mempertahankan fluks *permeate* pada tingkat operasional yang lebih stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa integrasi aerasi berbasis mikro-nanobubble tidak hanya meningkatkan transfer oksigen, tetapi juga berperan sebagai strategi pengendalian *fouling* berbasis hidrodinamika.

Selain mekanisme mekanik, integrasi sistem ini juga menunjukkan potensi peningkatan kualitas air melalui mekanisme oksidatif. Kolaps mikro-nanobubble dapat menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) yang membantu mendegradasi bahan organik pada permukaan membran [22]. Proses tersebut berkontribusi terhadap pengurangan *fouling* biologis sekaligus meningkatkan kualitas air tanpa ketergantungan tinggi pada bahan kimia pembersih, sehingga menjadikan sistem terintegrasi lebih efisien dan berkelanjutan untuk aplikasi RAS.

3.6. Analisis Hidrodinamika Sistem Terintegrasi

Kinerja sistem terintegrasi *bubble diffuser*-ultrafiltrasi sangat dipengaruhi oleh pola aliran, waktu tinggal fluida, distribusi turbulensi, serta konfigurasi komponen yang membentuk sistem. Dalam konteks RAS, distribusi aliran yang homogen penting untuk memastikan distribusi oksigen, penghilangan partikel tersuspensi, dan stabilitas kualitas air berlangsung secara merata. Analisis hidrodinamika diperlukan untuk memahami bagaimana interaksi antara aliran fluida dan sistem aerasi memengaruhi performa operasional secara keseluruhan.

Distribusi kecepatan fluida dan waktu tinggal air berperan penting dalam menjaga homogenitas kualitas air di dalam sistem budidaya [23]. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa stabilisasi pola aliran terjadi pada rentang *hydraulic retention time* tertentu, sedangkan efisiensi pergantian air meningkat secara progresif seiring meningkatnya waktu sirkulasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa optimasi karakteristik

hidrodinamika sangat penting untuk memastikan distribusi oksigen dan kualitas air berlangsung secara efektif.

Di sisi lain, pembentukan *microbubble* melalui mekanisme kavitasi hidrodinamik menghasilkan distribusi turbulensi yang lebih homogen dan pencampuran yang lebih efektif dibandingkan sistem konvensional [24]. Geometri sistem pembentuk gelembung memengaruhi intensitas turbulensi, kestabilan pembentukan gelembung, dan efisiensi pencampuran, sehingga desain hidrodinamika sistem menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa sistem terintegrasi.

3.7. Engineering Parameter dan Parameter Tak Berdimensi

Evaluasi fenomena transpor dan hidrodinamika pada integrasi *bubble diffuser*-ultrafiltrasi dalam sistem resirkulasi akuakultur memerlukan sejumlah parameter rekayasa (*engineering parameters*) untuk menggambarkan interaksi antara perpindahan massa, perpindahan momentum, efisiensi aerasi, dan performa filtrasi membran. Parameter tersebut tidak hanya digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi, tetapi juga menjadi dasar dalam optimasi desain sistem agar mampu mempertahankan kualitas air dan kestabilan operasional selama proses resirkulasi berlangsung. Dalam sistem akuakultur, karakteristik padatan tersuspensi, ukuran partikel, densitas, serta kecepatan pengendapan (*settling velocity*) menjadi parameter awal yang memengaruhi efisiensi pengolahan air karena menentukan perilaku transpor partikel di dalam kolom air maupun pada unit pemisahan. Akumulasi padatan tersuspensi dalam RAS berasal dari sisa pakan, feses, biofilm, dan material organik lainnya yang berkontribusi terhadap peningkatan hambatan hidraulik, penyumbatan komponen sistem, dan penurunan efisiensi pengolahan air, sehingga pengendalian karakteristik partikel menjadi aspek penting dalam pengelolaan kualitas air akuakultur [25].

Pada unit ultrafiltrasi, parameter teknik utama yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem meliputi tekanan trans membran (*transmembrane pressure*, TMP), fluks *permeat* (*permeate flux*, J), ukuran pori membran, efisiensi retensi kontaminan, serta resistansi *fouling*. TMP merepresentasikan gaya pendorong utama perpindahan fluida melalui membran, sedangkan fluks *permeat* menggambarkan kapasitas membran dalam menransportasikan air bersih melalui media filtrasi per satuan luas dan waktu. Dalam aplikasi akuakultur, parameter tersebut menentukan kemampuan sistem dalam menghilangkan partikel tersuspensi, bakteri, dan virus tanpa mengganggu kestabilan operasi filtrasi. Ultrafiltrasi mampu bertindak sebagai penghalang fisik (*physical barrier*) terhadap mikroorganisme patogen pada air akuakultur melalui mekanisme penyaringan berbasis ukuran pori, sehingga parameter seperti ukuran pori membran dan kestabilan fluks menjadi indikator penting dalam evaluasi performa sistem pengolahan air berbasis ultrafiltrasi [26].

Selain parameter filtrasi, fenomena transpor pada membran juga dipengaruhi oleh pembentukan *fouling* yang menyebabkan peningkatan resistansi perpindahan massa. Dalam sistem akuakultur, bahan organik ekstraseluler, protein, polisakarida, dan partikel halus dapat membentuk *cake layer* yang meningkatkan hambatan aliran dan mempercepat penurunan fluks *permeat*. Resistansi *fouling* berkaitan erat dengan interaksi adhesi antara *foulant* dan permukaan membran serta kohesi antar partikel *fouling*, yang pada akhirnya menentukan intensitas pembentukan lapisan resistif di atas membran [27]. Oleh karena itu, parameter seperti resistansi filtrasi (*filtration resistance*), ketebalan *cake layer*, dan efisiensi pembersihan membran menjadi indikator penting untuk mengevaluasi performa sistem ultrafiltrasi pada kondisi operasi jangka panjang.

Pada sistem terintegrasi *bubble diffuser*-ultrafiltrasi, ukuran gelembung dan karakteristik aliran menjadi parameter hidrodinamika penting karena memengaruhi intensitas pencampuran, distribusi tegangan geser (*shear stress*), serta efektivitas pengendalian *fouling* di sekitar permukaan membran. Gelembung makro (*microbubble*) dengan diameter kecil mampu mengurangi *fouling* membran melalui peningkatan pencampuran lokal dan pengurangan deposisi partikel pada permukaan membran, sehingga membantu mempertahankan kestabilan fluks filtrasi dalam periode operasi yang lebih panjang [28]. Selain meningkatkan performa filtrasi, distribusi gelembung yang lebih stabil juga berkontribusi terhadap pengurangan konsumsi energi dan frekuensi pembersihan membran, yang penting bagi keberlanjutan operasional sistem akuakultur resirkulasi.

Dari perspektif rekayasa transpor, perilaku sistem umumnya dijelaskan menggunakan bilangan tak berdimensi seperti *Reynolds Number* (Re), *Schmidt Number* (Sc), dan *Sherwood Number* (Sh) untuk menjelaskan hubungan antara perpindahan momentum dan perpindahan massa pada sistem multifase. *Reynolds Number* digunakan untuk mengidentifikasi rezim aliran dan tingkat turbulensi yang terbentuk di sekitar diffuser maupun membran, *Schmidt Number* menggambarkan rasio difusivitas momentum terhadap difusivitas massa, sedangkan *Sherwood Number* menunjukkan intensitas perpindahan massa konvektif dibandingkan difusi molekuler. Turbulensi lokal, *streaming flow*, dan kavitas mikro dapat mempercepat transpor massa menuju permukaan membran sekaligus mengurangi pembentukan lapisan *fouling* melalui peningkatan gaya geser dan pencampuran fluida [29]. Dengan demikian, integrasi parameter dimensional dan bilangan tak berdimensi menjadi dasar ilmiah dalam merancang sistem *bubble diffuser* ultrafiltrasi yang mampu mempertahankan transfer oksigen, kestabilan fluks membran, dan kualitas air secara simultan dalam sistem RAS.

3.8. Research Gap and Future Research

Berdasarkan tinjauan literatur secara menyeluruh, sebagian besar penelitian mengenai efektivitas sistem resirkulasi akuakultur (RAS) terintegrasi saat ini masih menitikberatkan pada evaluasi empiris terhadap performa biologis ikan, efisiensi produksi, dan kualitas air. Kondisi ini menyisakan celah pemahaman mekanistik yang mendalam terkait interaksi fenomena transpor dan hidrodinamika. Celah fundamental tersebut mencakup minimnya studi yang menguantifikasi secara terpisah antara efek mitigasi *fouling* membran murni mekanis (akibat turbulensi dan gaya geser) dengan efek oksidatif kimiawi melalui pelepasan *Reactive Oxygen Species* (ROS) dari kolapsnya *micro-nanobubble*. Selain itu, dari perspektif analisis hidrodinamika, pemodelan dinamika tiga fase yang memetakan lintasan gelembung (gas), pergerakan materi organik (padat), dan fluks isapan membran (cair) secara simultan di dalam satu reaktor masih sangat terbatas. Hal ini dipertegas dengan ketiadaan korelasi empiris parameter tak berdimensi seperti persamaan perpindahan massa yang divalidasi secara spesifik untuk karakteristik reologi fluida berbeban organik tinggi khas air limbah budidaya. Oleh karena itu, penelitian di masa depan perlu diarahkan pada pelaksanaan eksperimen berskala *pilot* guna memvalidasi interaksi fenomena transpor multifase tersebut, serta pengembangan model matematika yang komprehensif untuk memprediksi dinamika *fouling* secara presisi berdasarkan kondisi operasional di lapangan.

4. KESIMPULAN

Integrasi teknologi ultrafiltrasi dan *bubble diffuser* berukuran mikro-nano dalam Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) menciptakan sinergi keteknikan yang secara simultan mengoptimalkan kualitas air dan mengatasi kendala utama berupa *membrane fouling*. Berdasarkan prinsip fenomena transpor, penggunaan *micro-nanobubble* terbukti meningkatkan koefisien transfer massa volumetrik secara signifikan, menjaga stabilitas oksigen terlarut, dan meminimalkan tegangan geser pada organisme

budidaya. Dari aspek hidrodinamika, aliran dua fase yang dihasilkan mampu menciptakan turbulensi lokal dan gaya geser yang efektif menyapu akumulasi partikel tersuspensi, mengurangi ketebalan *cake layer*, serta memicu mekanisme *back diffusion* pada permukaan membran ultrafiltrasi. Sinergi ini diperkuat oleh efek oksidatif dari kolapsnya gelembung mikro-nano yang menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) untuk mendegradasi komponen *biofouling* organik. Pada akhirnya, pengendalian parameter rekayasa seperti tekanan trans membran (TMP), fluks *permeate*, serta manipulasi bilangan tak berdimensi (Reynolds, Schmidt, dan Sherwood) menjadi kunci utama dalam merancang sistem pengolahan air limbah akuakultur yang efisien, stabil, dan berkelanjutan untuk skala operasional jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] OECD, Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2025). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*, OECD Publishing, .
- [2] Virgantari, F., Koeshendrajana, S., Arthathiani, F. Y., Faridhan, Y. E., Wihartiko, F. D., (2022). “Pemetaan Tingkat Konsumsi Ikan Rumah Tangga di Indonesia”, *Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 17, pp. 97.
- [3] Kusriani, E., (2010). “Budidaya Ikan Hias sebagai Pendukung Pembangunan Nasional Perikanan di Indonesia”, *Media Akuakultur*, 5, pp. 109.
- [4] Bhatnagar, A., Devi, P., (2013). “Water quality guidelines for the management of pond fish culture”, , 3.
- [5] Maia, C. M., Gauy, A. C. D. S., Gonçalves-de-Freitas, E., (2025). “Fish Welfare in the Ornamental Trade: Stress Factors, Legislation, and Emerging Initiatives”, *Fishes*, 10, pp. 224.
- [6] Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., Verstraete, W., (2007). “Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production”, *Aquaculture*, 270, pp. 1–14.
- [7] Badiola, M., Mendiola, D., Bostock, J., (2012). “Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges”, *Aquacultural Engineering*, 51, pp. 26–35.
- [8] Sahetapy, J. M. F., Pattinasarany, M. M., Louhenapessy, D. G., (2022). “Pengaruh Perbedaan Sistem Resirkulasi terhadap Konsentrasi Amonia dan Kelangsungan Hidup Teripang Pasir (*Holothuria scabra*)”, *TRITON: Jurnal Manajemen Sumberdaya Perairan*, 18, pp. 141–148.
- [9] Lembang, M. S., Kuing, L., (2022). “Efektivitas Pemanfaatan Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) terhadap Kualitas Air dalam Budidaya Ikan Koi (*Cyprinus rubrofasciatus*)”, *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 12, pp. 105–112.
- [10] Suriasni, P. A., Faizal, F., Panatarani, C., Hermawan, W., Joni, I. M., (2023). “A Review of Bubble Aeration in Biofilter to Reduce Total Ammonia Nitrogen of Recirculating Aquaculture System”, *Water*, 15, pp. 808.
- [11] Heriyati, E., Rustadi, R., Isnansetyo, A., Triyatmo, B., Istiqomah, I., Deendarlianto, D., Budhijanto, W., (2022). “Microbubble Aeration in A Recirculating Aquaculture System (RAS) Increased Dissolved Oxygen, Fish Culture Performance, and Stress Resistance of Red Tilapia (*Oreochromis sp.*)”, *Trends in Sciences*, 19, pp. 6251.
- [12] Hashmi, Z., Metali, F., Amin, M., Abu Bakar, M. S., Wibisono, Y., Nugroho, W. A., Bilad, M. R., (2025). “Recirculating aquaculture systems: Advances, impacts, and integrated pathways for sustainable growth”, *Bioresource Technology Reports*, 32, pp. 102340.
- [13] Kristina, T., Assiddiqi, T. D., Setiawan, B. I., Arif, C., Kurniawan, A., (2023). “Kinerja Unit dan Isoterm Adsorpsi Filtrasi Multimedia Pada Sistem Resirkulasi Akuakultur Ikan Hias Berdasarkan Variasi Ketebalan Media dan Debit Aliran”, *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21, pp. 933–945.

- [14] Plawsky, J. L., (2019). *Transport phenomena fundamentals*, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [15] Martin, J. L., McCutcheon, S. C., Schottman, R. W., (1999). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*, Lewis Publishers, Boca Raton.
- [16] Arias-Torres, L., Silva, J., Ortiz, R., Carlesi, C., Aroca, G., (2025). “Comparative Analysis of Volumetric Mass Transfer Coefficients for Oxygen Uptake and Desorption with Nanobubbles”, *Water*, 17, pp. 130.
- [17] Xuan, N. T. T., Ngoc, N. T. T., Hien, V. T. T., Minh, N. H., (2026). “Micro-nanobubble technology in microalgae cultivation: a comprehensive overview”, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, , pp. 19–25.
- [18] English, N. J., (2025). “Industrial-Scale Wastewater Nano-Aeration and -Oxygenation and Dissolved Air Flotation: Electric Field Nanobubble and Machine Learning Approaches to Enhanced Nano-Aeration and Flotation”, *Environments*, 12, pp. 228.
- [19] Wu, S.-E., Kuo, C.-H., (2026). “Enhanced performance of submerged membrane microfiltration by aeration and backwash for mitigating particle fouling”, *Chemical Engineering Journal Advances*, 26, pp. 101203.
- [20] Ferrera, E., Ruigómez, I., González-Martín, C., Mejías, C., Vera, L., (2026). “Influence of Photoperiod on Membrane Fouling Reported in a Membrane Photobioreactor for Reclamation of Anaerobic Effluent”, *ACS ES&T Water*, 6, pp. 1448–1462.
- [21] Li, Z., Wang, X., Mwanga, N., Fu, J., Gao, W., Zhang, J., (2026). “Enhanced Organic Fouling Control and Energy-Saving Strategies in PVDF Hollow Fiber Membrane Ultrafiltration via Intermittent Micro–Nanobubble Aeration”, *Membranes*, 16, pp. 182.
- [22] Singh, B., Park, G., Ryu, J.-H., Park, M.-H., (2025). “Micro-Nanobubble Technology in Surface Cleaning and Defouling”, *Applied Sciences*, 15, pp. 1197.
- [23] Lee, S.-J., Shin, H. G., Han, K.-N., (2026). “Evaluation of fluid behavior and turnover in aquaculture tanks using CFD and transient temperature fields”, *Aquacultural Engineering*, 114, pp. 102719.
- [24] Pagan, F. D. S., Mateus, M. V., Soeira, T. V. R., Da Luz, M. S., Ferreira, D. C., Moruzzi, R., Simões, A. L. A., Gonçalves, J. C. D. S. I., (2026). “Integrating Coagulation and Flotation via Hydrodynamic Cavitation: The Key Role of Venturi Divergent Angle for Humic Substance Removal”, *Clean Technologies*, 8, pp. 27.
- [25] Bao, W., Zhu, S., Jin, G., Ye, Z., (2019). “Generation, characterization, perniciousness, removal and reutilization of solids in aquaculture water: a review from the whole process perspective”, *Reviews in Aquaculture*, 11, pp. 1342–1366.
- [26] Mota, V. C., Brenne, H., Kojen, M., Marhaug, K. R., Jakobsen, M. E., (2022). “Evaluation of an ultrafiltration membrane for the removal of fish viruses and bacteria in aquaculture water”, *Frontiers in Marine Science*, 9, pp. 1037017.
- [27] Huang, W., Yuan, Q., Yang, H., Zhang, Y., Zhou, W., Lv, W., Chu, H., (2025). “Insight into membrane fouling and purification performance of aquaculture wastewater using combined microalgae and dynamic membrane”, *Applied Water Science*, 15, pp. 190.
- [28] Watabe, T., Matsuyama, K., Takahashi, T., Matsuyama, H., (2016). “Use of microbubbles to reduce membrane fouling during water filtration”, *Desalination and Water Treatment*, 57, pp. 3820–3826.
- [29] Radziuk, D., Möhwald, H., (2016). “Ultrasonic Mastering of Filter Flow and Antifouling of Renewable Resources”, *ChemPhysChem*, 17, pp. 931–953.