

**STRATEGI PEMULIHAN AIR PASCATAMBANG BATUBARA  
BERBASIS EKONOMI SIRKULAR DAN POTENSINYA UNTUK  
BUDIDAYA IKAN DENGAN RECIRCULATING AQUACULTURE  
SYSTEM (RAS) : A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW**

*POST-COAL MINING WATER RECOVERY STRATEGY BASED ON CIRCULAR  
ECONOMY AND ITS POTENTIAL FOR FISH CULTIVATION WITH  
RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM (RAS): A SYSTEMATIC  
LITERATURE REVIEW*

**Yulius Kisworo<sup>1</sup>, Rina Iskandar<sup>2</sup>, Bahrn<sup>3</sup>, Frans Toni<sup>4</sup>, Rozzana Erziaty<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Budidaya Perairan Fakultas Pertanian Universitas Achmad Yani  
Banjarmasin

<sup>4</sup>Prodi Ilmu Kelautan Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Lambung  
Mangkurat

<sup>5</sup>Program Studi Ekonomi Syariah Fakultas Studi Islam Universitas Islam  
Kalimantan

e-mail : [yuliuskisworo@uay.ac.id](mailto:yuliuskisworo@uay.ac.id)

**Abstract**

*Coal post-mining water represents a major environmental challenge due to its low pH and elevated concentrations of dissolved metals, particularly iron (Fe) and manganese (Mn). However, within a circular economy framework, post-mining water can be recovered and reused as a valuable resource. This study aimed to identify, evaluate, and synthesize resource recovery strategies for coal post-mining water and assess their potential application in Recirculating Aquaculture Systems (RAS). A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA guidelines. The literature search identified 90 records, and after a rigorous screening process, 23 articles met the inclusion criteria and were included in the qualitative synthesis. The results showed that phytoremediation, bioremediation, constructed wetlands, electrocoagulation, and biosorbents effectively improved water quality by increasing pH and reducing Fe and Mn concentrations. Furthermore, the biological treatment mechanisms applied in these technologies were conceptually compatible with the biofiltration processes used in RAS. The integration of mine water reuse, aquaponics, nutrient recovery, and waste utilization demonstrated strong potential to support circular economy practices. Overall, recovered coal post-mining water showed considerable potential as an alternative water source for RAS, although further technical and biological validation is required before large-scale implementation.*

**Keywords:** *Coal post-mining water; Circular economy; Recirculating Aquaculture System (RAS); Resource recovery; Water reuse.*

**PENDAHULUAN**

Pertambangan batubara merupakan salah satu sektor strategis yang berperan penting dalam

mendukung pembangunan ekonomi dan ketahanan energi nasional. Namun, aktivitas pertambangan juga menghasilkan berbagai dampak lingkungan yang memerlukan

pengelolaan berkelanjutan, terutama pada tahap pascatambang. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) melaporkan bahwa luas wilayah izin usaha pertambangan (IUP) di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 9.112.732 hektare yang mencakup kegiatan eksplorasi, operasi produksi, pascatambang, dan wilayah pencadangan. Dari total luasan tersebut, wilayah operasi produksi batubara mencapai sekitar 3,98 juta hektare, sedangkan wilayah eksplorasi batubara mencapai 117.278 hektare, menunjukkan bahwa batubara masih menjadi salah satu komoditas pertambangan dengan cakupan lahan terbesar di Indonesia (Mochammad Ryan, 2023). Luasnya aktivitas pertambangan batubara tersebut berimplikasi pada meningkatnya kawasan pascatambang yang memerlukan upaya reklamasi dan pemulihan lingkungan secara berkelanjutan.

Salah satu permasalahan lingkungan yang paling umum dijumpai pada kawasan pascatambang batubara adalah terbentuknya air pascatambang atau air asam tambang (*acid mine drainage/AAT*). Air asam tambang terbentuk akibat oksidasi mineral sulfida yang terpapar udara dan air selama proses penambangan, sehingga menghasilkan air dengan nilai pH rendah dan kandungan logam terlarut yang relatif tinggi, terutama besi (Fe) dan mangan (Mn) (Habibullah et al., 2021; Sandrawati et al., 2018).

Keberadaan logam-logam tersebut berpotensi menurunkan kualitas badan air penerima, mengganggu fungsi ekosistem perairan, serta membatasi pemanfaatan sumber daya air untuk

berbagai kegiatan produktif apabila tidak dikelola secara tepat (Norfaeda & Kartini, 2024; Perala et al., 2022).

Pengelolaan air pascatambang menjadi salah satu komponen penting dalam kegiatan reklamasi dan pascatambang untuk memastikan tercapainya keberlanjutan lingkungan pada kawasan pertambangan batubara ((Tyas et al., 2026)

Seiring meningkatnya perhatian terhadap efisiensi pemanfaatan sumber daya dan keberlanjutan lingkungan, paradigma pengelolaan air pascatambang mulai bergeser dari pendekatan konvensional yang berorientasi pada pengolahan dan pembuangan limbah menuju pendekatan ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan kembali sumber daya. Dalam konsep ekonomi sirkular, air pascatambang tidak lagi dipandang sebagai limbah yang harus dibuang setelah memenuhi baku mutu lingkungan, melainkan sebagai sumber daya potensial yang dapat dipulihkan, dimanfaatkan kembali, dan diintegrasikan ke dalam berbagai sistem produksi yang lebih berkelanjutan (Maharajh et al., 2020). Pendekatan ini sejalan dengan upaya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya melalui penerapan prinsip *resource recovery*, *water reuse*, dan *nutrient recycling* yang semakin banyak dikembangkan pada sektor akuakultur dan pengelolaan lingkungan (Campanati et al., 2022; Regueiro et al., 2022a).

Salah satu sektor yang berpotensi memanfaatkan hasil pemulihan air pascatambang adalah akuakultur. Kebutuhan air yang tinggi dalam kegiatan budidaya perikanan mendorong pengembangan berbagai teknologi yang mampu

meningkatkan efisiensi penggunaan air, salah satunya melalui Sistem Resirkulasi Akuakultur (Recirculating Aquaculture System/RAS). Sistem ini memungkinkan penggunaan kembali air budidaya melalui serangkaian proses filtrasi fisik, kimia, dan biologis sehingga mampu mengurangi kebutuhan air baru sekaligus menjaga kualitas lingkungan budidaya (Adinda et al., 2021; I Dewa Gede Tresna Yudiana & Swasta, 2022). Sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, RAS juga dipandang sebagai salah satu bentuk penerapan *water reuse* yang mendukung pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan.

Potensi tersebut semakin relevan dengan berkembangnya Sistem Resirkulasi Akuakultur (Recirculating Aquaculture System/RAS), yaitu teknologi budidaya yang mengutamakan efisiensi penggunaan air melalui proses filtrasi dan penggunaan kembali air secara berulang (Kisworo, 2025). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan RAS mampu mengurangi kebutuhan air baru, meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, serta mendukung praktik budidaya yang lebih ramah lingkungan (Firdausi et al., 2024a; I Dewa Gede Tresna Yudiana & Swasta, 2022; Jacinda et al., 2021). Dukungan penelitian mengenai lain, ekonomi sirkular dalam akuakultur menekankan pentingnya konsep *water reuse*, *nutrient recovery*, dan *resource recovery* sebagai strategi untuk meningkatkan keberlanjutan sistem produksi perikanan (Campanati et al., 2022; Regueiro et al., 2022a).

Terlepas dari semakin berkembangnya penelitian mengenai

pemulihan air pascatambang, penerapan ekonomi sirkular, dan teknologi Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS), sintesis pengetahuan yang menghubungkan ketiga aspek tersebut masih sangat terbatas. Akibatnya, efektivitas berbagai strategi pemulihan air pascatambang serta potensi penerapannya dalam sistem akuakultur berbasis RAS belum terdokumentasi dan dievaluasi secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan kajian sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah yang tersedia guna membangun pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peluang integrasi sektor pertambangan dan akuakultur dalam kerangka ekonomi sirkular.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk menjamin proses identifikasi, seleksi, penilaian kelayakan, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi (Adik & Septiara, 2021). Dengan Mengadopsi teknik (Di Vaio et al., 2024) Proses penelitian dengan metode ini mencakup dua tahap, yaitu pertama, mengidentifikasi, membaca, dan menafsirkan publikasi terkait, dan kedua, melakukan evaluasi bibliometrik dari dokumen publikasi yang telah dipilih. Sesuai dengan pedoman yang diterapkan dalam metode Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta Analyses (PRISMA), langkah pada tahap awal, yakni: (1)

mengidentifikasi artikel yang telah dipublikasikan; (2) menyaring artikel; (3) memilih artikel yang relevan dan layak; dan (4) menyelesaikan serta mencantumkan artikel-artikel yang siap untuk dianalisis

Langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah identifikasi (seleksi tahap 1) dari database Google Scholar dengan menggunakan tool Google Scholar lab. kata kunci yang digunakan : Pemanfaatan air tambang, Air tambang batu bara, Air asam tambang, Fitoremediasi, menghilangkan kandungan Fe di air tambang, Menghilangkan kandungan Mangan (Mn) di air tambang, Lahan basah buatan, Ekonomi sirkular, Pemulihan sumber daya, Pemanfaatan kembali air, Sistem akuakultur resirkulas (RAS). Kriteria yang digunakan inklusi (berhubungan dengan kata kunci) dan Eksklusi Tidak Berhubungan dengan kata Kunci. Data dikoleksi dengan file RIS dengan tool Mandelley yang sekaligus menseleksi duplikasi dan tahun rentang artikel (2016-2026).

Selanjutnya Seleksi Tahap 2 dengan menggunakan tool Exel sebagai alat bantu pembuatan tabulasi. Seleksi berdasarkan jenis dokumen, tahun publikasi, kesesuaian judul, kesesuaian abstrak dari data yang diseleksi tahap 1 hanya yang berkategori inklusi.

Data yang didapat pada tahap 2 selanjutnya dievaluasi melalui pembacaan abstrak dan telaah teks lengkap (*full-text review*). Pada tahap ini dilakukan penilaian terhadap: tujuan penelitian, objek kajian, metode penelitian, strategi pemulihan sumber daya dan relevansi terhadap tujuan SLR.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Rekapitulasi Hasil dan Karakteristik jurnal terinklusi

Proses seleksi literatur dilakukan mengikuti pedoman PRISMA. Penelusuran awal menghasilkan 90 referensi yang diekspor ke format RIS. Setelah proses verifikasi dokumen, 2 dokumen non-jurnal dieliminasi sehingga tersisa 88 artikel jurnal yang memenuhi syarat untuk proses seleksi tahap 2. Meliputi tahap seleksi judul, sebanyak 58 artikel dieliminasi karena tidak sesuai dengan fokus penelitian, yaitu pemulihan air pascatambang batubara, ekonomi sirkular, dan Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS). Dengan demikian, diperoleh 30 artikel yang dilanjutkan ke tahap 3 yaitu evaluasi abstrak dan telaah teks lengkap (*full-text review*).

Hasil evaluasi abstrak dan full-text review menunjukkan bahwa 7 artikel tidak memenuhi kriteria inklusi karena tidak membahas strategi pemulihan air pascatambang, tidak relevan dengan konsep ekonomi sirkular, atau tidak memberikan informasi yang memadai terkait potensi pemanfaatan kembali sumber daya air. Oleh karena itu, sebanyak 23 artikel dinyatakan memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan dalam sintesis kualitatif. Artikel-artikel tersebut kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai strategi pemulihan air pascatambang batubara berbasis ekonomi sirkular serta potensi penerapannya pada Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS). Secara lengkap disusun dalam bentuk tabulasi berikut.

Tabel 1. Tahapan Seleksi berdasarkan PRIMA

Tahapan Seleksi Literatur	Jumlah Artikel
Artikel teridentifikasi melalui penelusuran literatur	90
Dokumen non-jurnal dieliminasi	2
Artikel jurnal yang disaring	88
Artikel dieliminasi pada screening judul	58
Artikel lolos screening judul	30
Artikel dieliminasi setelah evaluasi abstrak dan full-text review	7
Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan disintesis	23

Sumber : data primer diolah 2026

Berdasarkan Tabel 1, terjadi penurunan jumlah artikel yang cukup signifikan dari tahap identifikasi hingga sintesis akhir. Dari 90 referensi awal yang ditemukan, hanya 23 artikel (25,6%) yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan relevan dengan tujuan penelitian. Tingginya jumlah artikel yang dieliminasi pada tahap screening judul menunjukkan bahwa banyak publikasi membahas topik pertambangan, akuakultur, atau pengelolaan lingkungan secara umum, namun tidak secara spesifik mengkaji pemulihan air pascatambang batubara dalam kerangka ekonomi sirkular maupun potensi penerapannya pada Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS). Hasil ini mengindikasikan bahwa penelitian yang menghubungkan

sektor pertambangan dan akuakultur masih relatif terbatas sehingga memerlukan sintesis yang lebih komprehensif. Dalam analisis sistematis ini, total 23 artikel ilmiah digunakan sebagai sumber utama.

Selanjutnya Karakteristik jurnal yang digunakan di sajikan pada Tabel 2 berikut

Tabel 2. Karakteristik Jurnal Terinklusi

Karakteristik Jurnal	Jumlah Artikel	Kode Artikel
Rentang Tahun	2016-2026	-
Total Artikel Sintesis (memenuhi semua tahapan 1-3)	23	-
Artikel digunakan lintas tema	6	-
Air Pascatambang, Fitoremediasi, Constructed Wetland, Fe-Mn Removal, Bioremediasi	10	13,14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
Sistem RAS dan Water Reuse	4	1, 2, 10, 11,23
Circular Economy dan Resource Recovery	4	3, 4, 6, 8,14
Nutrient Recovery dan Pemanfaatan Limbah	5	1,5, 6,7, 9, 12, 13

Berikut disampikan hasil inventarisir jurnal dari *database Google Scolar tool Lab.* yang memenuhi kriteria seleksi tahap 1-3.

Tabel 3. Inventarisir Jurnal yang Memenuhi Syarat Tahapan Seleksi berdasarkan PRISMA

Author & Tahun	Judul Artikel	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Strategi Pemulihan Sumber Daya	Temuan Utama	Relevansi terhadap SLR
(Yudiana et al., 2022)	Studi Perbandingan Kandungan Amonia Bebas (NH3) pada Budidaya Ikan Nila dengan Menggunakan Sistem Resirkulasi yang Berbeda	Membandingkan efektivitas biofilter tanaman dan biofilter bakteri dalam menurunkan amonia	Eksperimental	Water Reuse, Fitoremediasi, Bioremediasi	Biofilter pakcoy lebih efektif menurunkan amonia dibanding biofilter bakteri	Sistem RAS, Nutrient Recovery
(Jacinda et al., 2021)	Aplikasi Teknologi Recirculating Aquaculture System (RAS) di Indonesia: A Review	Mengkaji perkembangan dan penerapan RAS di Indonesia	Literature Review	Water Reuse, Pengelolaan Limbah	RAS mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mendukung budidaya berkelanjutan	Sistem RAS, Sustainability
(Usman & Bulan, 2024)	Respon Pelaku Usaha Budidaya Lele terhadap Penyuluhan Agribisnis Sirkular: Studi Pemanfaatan Limbah Air Budidaya Menjadi Pupuk Cair	Menganalisis pemanfaatan limbah budidaya menjadi pupuk cair	Studi Kasus	Produksi Pupuk Organik, Circular Economy	Limbah budidaya dapat dimanfaatkan menjadi pupuk cair bernilai ekonomi	Resource Recovery, Circular Economy
(Maharajh et al., 2020)	Mine Water: A Resource for the Circular Economy in South African Mining Communities	Mengkaji potensi air tambang sebagai sumber daya dalam ekonomi sirkular	Review Konseptual	Water Reuse, Circular Economy, Waste-to-Resource	Air tambang dapat dimanfaatkan untuk produksi pangan, biomassa, energi, dan air bersih	Air Pascatambang, Resource Recovery
(Maharajh et al., 2020)	Pemanfaatan Air Limbah Budidaya Ikan sebagai Pupuk Organik Cair Tanaman di Kelurahan Kraton Kabupaten Bangkalan	Memfaatkan limbah budidaya sebagai pupuk organik cair	Pengabdian Masyarakat	Nutrient Recovery, Produksi Pupuk Organik	Limbah budidaya mengandung unsur hara yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk	Limbah Budidaya, Nutrient Recovery

(Campana et al., 2022)	Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth	Mengidentifikasi peluang pemulihan unsur hara dalam akuakultur	Systematic Review	Nutrient Recovery, Circular Economy, Water Reuse	Limbah akuakultur dapat dimanfaatkan melalui IMTA, mikroalga, biofilter, dan RAS	Resource Recovery, Circular Economy
(Arfiatia et al., 2020) et al.	Dinamika Jumlah Bakteri Bacillus subtilis dalam Penurunan Kadar Bahan Organik TOM Limbah Budidaya Ikan Lele Sangkuriang	Mengetahui pengaruh Bacillus subtilis terhadap penurunan bahan organik limbah	Eksperimental	Bioremediasi	Bacillus subtilis efektif menurunkan bahan organik limbah budidaya	Limbah Budidaya Akuakultur
(Regueiro et al., 2022b)	Opportunities and Limitations for the Introduction of Circular Economy Principles in EU Aquaculture Based on the Regulatory Framework	Menganalisis peluang dan hambatan ekonomi sirkular dalam akuakultur	Review	Circular Economy, Sludge Utilization, Waste Valorization	Pemanfaatan sludge, bioflok, IMTA dan aquaponik mendukung ekonomi sirkular	Circular Economy, Resource Recovery
(Noer et al., 2025)	Pengaruh Pemberian Air Limbah Budidaya Ikan Lele terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawi	Menguji pemanfaatan air limbah budidaya sebagai pupuk	Eksperimental	Nutrient Recovery	Air limbah budidaya meningkatkan pertumbuhan tanaman sawi	Nutrient Recovery
(Kisworo, 2025)	Literature Review RAS Biostimulan: Critical Analysis of Potential and Challenges	Mengkaji integrasi RAS dan biostimulan	Literature Review	Water Reuse, Circular Aquaculture	Integrasi RAS dan biostimulan meningkatkan efisiensi penggunaan air dan kualitas lingkungan budidaya	Sistem RAS, Sustainability
(Firdausi et al., 2024)	Efektivitas Budidaya Lele dengan RAS di Sujafish Farm	Mengevaluasi efektivitas penerapan RAS pada budidaya lele	Studi Kasus	Water Reuse	RAS mampu menjaga kualitas air dan meningkatkan efisiensi budidaya	Sistem RAS

(Handayani et al., 2020)	Akuaponik sebagai Sistem Pemanfaatan Limbah Budidaya Ikan Lele	Memanfaatkan limbah budidaya sebagai sumber hara tanaman	Pengabdian Masyarakat	Nutrient Recovery, Water Reuse	Limbah budidaya dapat dimanfaatkan untuk pertumbuhan tanaman sayuran	Nutrient Recovery, Circular Economy
(Mustikarini et al., 2022)	Pengaruh Variasi Komposisi Dekomposer EM4 dan Molase pada Pembuatan Pupuk Organik Cair dari Limbah Budidaya Lele	Mengolah limbah budidaya menjadi pupuk organik cair	Eksperimental	Produksi Pupuk Organik, Waste-to-Resource	Limbah budidaya berhasil dikonversi menjadi pupuk organik cair	Resource Recovery, Circular Economy
(Norfaeda & Kartini, 2024)	Pengolahan Air Limbah Tambang Menggunakan Limbah Kulit Langsat: Penurunan Kadar Logam Total Fe dan Mn	Menguji kemampuan kulit langsung sebagai biosorben dalam menurunkan kadar Fe dan Mn pada air limbah tambang batubara.	Eksperimental, analisis laboratorium, biosorpsi	Bioremediasi; Waste-to-resource; Pemanfaatan limbah pertanian; Pemanfaatan air pascatambang.	Bubuk kulit langsung 1% menurunkan Fe sebesar 23,8% dan Mn sebesar 56%. Limbah pertanian berpotensi menjadi biosorben murah dan ramah lingkungan untuk pengolahan air tambang.	Pemulihan Sumber Daya; Air Pascatambang Batubara; Ekonomi Sirkular; Reklamasi Tambang
(Habibullah et al., 2021)	Pemanfaatan Typha angustifolia dan Fungi Mikoriza Arbuskular untuk Fitoremediasi Air Asam Tambang	Mengetahui pengaruh dosis FMA terhadap pertumbuhan Typha angustifolia dan kemampuan serapan Fe serta Mn pada air asam tambang.	Eksperimental, RAL, fitoremediasi, analisis laboratorium.	Fitoremediasi; Bioremediasi; Pemanfaatan air pascatambang.	Dosis FMA terbaik untuk penyerapan logam adalah 12 g/emper dengan Indeks Fitoremediasi Mn 98,94% dan Fe 57,93%, sehingga memenuhi baku mutu lingkungan. Typha efektif sebagai tanaman akumulator logam pada AAT.	Pemulihan Sumber Daya; Air Pascatambang Batubara; Reklamasi Tambang; Keberlanjutan Akuakultur

<p>(Tyas et al., 2026)</p>	<p>Desain Konstruksi Wetland untuk Pengelolaan Air Asam Tambang di Void Pasca Tambang Batubara</p>	<p>Merancang dan mengevaluasi constructed wetland sebagai sistem pengolahan pasif AAT pada void pascatambang menggunakan Typha sp. dan mikroalga.</p>	<p>Studi kasus, karakterisasi geokimia, analisis hidrologi, pilot project wetland, analisis laboratorium.</p>	<p>Fitoremediasi; Bioremediasi; Penggunaan kembali air; Pemanfaatan air pascatambang; Reklamasi berbasis perairan.</p>	<p>Constructed wetland meningkatkan pH hingga 6,91 dan menurunkan logam terlarut di bawah baku mutu. Sistem wetland dinilai efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk pengelolaan AAT pada void tambang.</p>	<p>Air Pascatambang Batubara; Reklamasi Tambang; Pemulihan Sumber Daya; Penggunaan Kembali Air</p>
<p>(Sandrawati et al., 2018)</p>	<p>Potensi Pemanfaatan Tanaman Typha sp dan Cyperus sp dalam Proses Remediasi Air Asam Tambang dengan Sistem Rawa Buatan</p>	<p>Mengidentifikasi peran tanaman dalam perbaikan kualitas air asam tambang dan produksi biomassa</p>	<p>Eksperimental</p>	<p>Fitoremediasi, Constructed Wetland, Fe dan Mn Removal</p>	<p>Typha dan Cyperus mampu mengakumulasi Fe dan Mn pada akar. Cyperus menunjukkan kemampuan akumulasi Fe yang lebih baik. Biomassa tanaman berpotensi dimanfaatkan kembali.</p>	<p>Fitoremediasi Air Tambang, Constructed Wetland</p>
<p>(Andini Adi et al., 2023)</p>	<p>Pengaruh Waktu Kontak serta Jenis Elektroda Al-Al dan Al-Fe pada Elektrokoagulasi dalam Penyisihan Fe dan Mn Air Asam Tambang</p>	<p>Menentukan efektivitas elektrokoagulasi untuk menurunkan Fe dan Mn</p>	<p>Eksperimental Laboratorium</p>	<p>Fe dan Mn Removal</p>	<p>Elektroda Al-Al dengan waktu kontak 180 menit mampu menurunkan Fe hingga 100% dan Mn hingga 96%.</p>	<p>Pemulihan Air Pascatambang</p>

(Ibrahim et al., 2024)	Analisis Metode Elektrokoagulasi pada Air Asam Tambang dengan Variasi Tegangan dan Jarak Elektroda	Mengevaluasi kinerja elektrokoagulasi terhadap Fe dan Mn	Eksperimental Laboratorium	Fe dan Mn Removal	Efisiensi penyisihan Fe mencapai 97% dan Mn mencapai 99% pada kondisi optimum.	Pemulihan Air Pascatambang
(Fridriyanda et al., 2022)	Studi Literatur Jenis Tanaman Pengelola Air Asam Tambang Batubara dengan Cara Fitoremediasi pada Sistem Lahan Basah Buatan	Mengidentifikasi tanaman paling efektif untuk fitoremediasi AAT	Studi Literatur	Fitoremediasi, Constructed Wetland, Fe dan Mn Removal	Typha angustifolia dinilai paling efektif dan tahan terhadap kondisi air asam tambang serta mampu menurunkan Fe dan Mn.	Fitoremediasi Air Tambang
(Perala et al., 2022)	Pengaruh Jenis Bahan Organik dan Bakteri Pereduksi Sulfat terhadap Konsentrasi Fe dan Mn dalam Remediasi Air Asam Tambang	Menilai pengaruh bahan organik dan SRB terhadap Fe dan Mn	Eksperimental	Bioremediasi, Fe dan Mn Removal, Constructed Wetland	Kombinasi bahan organik dan bakteri pereduksi sulfat meningkatkan pH dan menurunkan Fe serta Mn terlarut.	Bioremediasi Air Tambang
(Perala et al., 2022)	Bioremediasi Air Asam Tambang Batubara dengan Pengayaan Bakteri Pereduksi Sulfat dan Penambahan Substrat Organik	Mengembangkan metode bioremediasi AAT menggunakan SRB	Eksperimental	Bioremediasi, Fe Removal, Resource Recovery	Penambahan substrat organik meningkatkan pH hingga >6 dan menurunkan Fe sebesar 88,18–97,27%.	Pemulihan Air Pascatambang
(Busyairi et al., 2019)	Pemanfaatan Serbuk Kayu Meranti Menjadi Karbon Aktif untuk Penurunan Kadar Besi (Fe), Mangan (Mn) dan Kondisi pH pada Air Asam Tambang	Menilai kemampuan karbon aktif serbuk kayu untuk mengolah AAT	Eksperimental	Fe dan Mn Removal, Waste-to-Resource	Karbon aktif dari limbah serbuk kayu mampu menurunkan Fe, Mn dan memperbaiki pH air asam tambang.	Pemulihan Air Pascatambang, Ekonomi Sirkular

Sumber data diolah 2026

**B. Strategi Pemulihan Air Pascatambang Batubara Berbasis Ekonomi Sirkular Dan Potensinya untuk Budidaya Ikan Sistem RAS**

Hasil sintesis berdasarkan data 23 jurnal yang telah melewati tahap seleksi 3. Secara lengkap disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Sintesis Jurnal Terseleksi

Aspek	Hasil Sintesis
Teknologi pemulihan air	Fitoremediasi, bioremediasi, <i>constructed wetland</i> , elektrokoagulasi, dan biosorben terbukti meningkatkan pH serta menurunkan Fe dan Mn hingga memenuhi atau mendekati baku mutu lingkungan.
Parameter penting bagi RAS	pH, Fe, Mn, bahan organik, dan amonia merupakan parameter kunci yang menentukan keberhasilan budidaya pada sistem RAS.
Kesesuaian dengan prinsip RAS	Mekanisme fitoremediasi, biofiltrasi, nitrifikasi, dan bioremediasi memiliki kesamaan proses dengan unit biofilter pada RAS.
Potensi penggunaan kembali air	Air pascatambang yang telah dipulihkan berpotensi menjadi sumber air alternatif untuk RAS setelah melalui tahap pemantauan dan pengolahan lanjutan.
Integrasi ekonomi sirkular	Dapat menghubungkan <i>mine water reuse</i> , biofilter RAS, akuaponik, pemulihan unsur hara, produksi pupuk organik, dan pemanfaatan biomassa.
Kontribusi resource recovery	Air, unsur hara, biomassa tanaman, limbah organik, dan lumpur budidaya dapat dikonversi menjadi sumber daya bernilai ekonomi.

Tantangan utama	Stabilitas kualitas air, residu logam berat, akumulasi unsur toksik, kebutuhan <i>pretreatment</i> , dan minimnya uji budidaya jangka panjang.
Kesiapan teknologi	Tinggi pada tingkat konseptual dan pilot-scale, namun masih memerlukan validasi biologis, teknis, dan ekonomi pada sistem budidaya nyata.

Sumber: sintesis 23 artikel yang memenuhi kriteria .

Hasil sintesis tabel 4 menunjukkan bahwa teknologi pemulihan air pascatambang batubara memiliki potensi yang signifikan untuk mendukung pengembangan Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) dalam kerangka ekonomi sirkular. Berbagai pendekatan yang teridentifikasi, seperti fitoremediasi, bioremediasi, *constructed wetland*, elektrokoagulasi, dan *biosorben*, memiliki tujuan yang sama yaitu meningkatkan kualitas air melalui peningkatan pH serta penurunan konsentrasi Fe dan Mn. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa teknologi tersebut mampu menurunkan logam terlarut hingga memenuhi baku mutu lingkungan, sementara sistem *constructed wetland* dan bioremediasi mampu meningkatkan pH hingga mendekati kondisi netral. Temuan ini menunjukkan bahwa air pascatambang tidak lagi dipandang sebagai limbah yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya yang dapat dipulihkan dan dimanfaatkan kembali (*mine water reuse*) sesuai prinsip ekonomi sirkular (Maharajh et al., 2020; Sandrawati et al., 2019; Tyas et al., 2026).

Secara konseptual, terdapat kesamaan yang kuat antara mekanisme pemulihan air pascatambang dan prinsip pengolahan biologis pada RAS. Sistem RAS mengandalkan biofilter dan proses nitrifikasi untuk mengendalikan akumulasi amonia serta mempertahankan kualitas air budidaya, sedangkan teknologi fitoremediasi dan bioremediasi memanfaatkan tanaman serta mikroorganisme untuk menurunkan konsentrasi logam dan memperbaiki karakteristik kimia air. Penelitian (Yudiana et al., 2022) menunjukkan bahwa biofilter tanaman lebih efektif menurunkan amonia dibandingkan biofilter bakteri pada budidaya ikan nila, sementara Perala et al., (2022); Sandrawati et al., (2019), memberikan fakta bakteri pereduksi sulfat mampu meningkatkan pH dan menurunkan Fe secara signifikan. Kesamaan prinsip tersebut menunjukkan bahwa integrasi teknologi pemulihan air pascatambang dengan unit biofiltrasi RAS secara teoritis sangat memungkinkan untuk dikembangkan.

Berdasarkan perspektif kualitas air, hasil sintesis menunjukkan bahwa air pascatambang yang telah melalui proses pemulihan memiliki karakteristik yang semakin mendekati persyaratan dasar untuk digunakan kembali dalam sistem budidaya berbasis RAS. Penurunan Fe dan Mn melalui elektrokoagulasi, biosorben, maupun fitoremediasi dapat mengurangi risiko toksisitas terhadap organisme budidaya, sedangkan peningkatan pH melalui constructed wetland dan bioremediasi mendukung kestabilan lingkungan perairan. Namun

demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada parameter kualitas air dan belum banyak mengevaluasi performa biologis ikan secara langsung. Oleh karena itu, meskipun hasil pengolahan menunjukkan potensi yang menjanjikan, diperlukan tahap pretreatment dan pemantauan kualitas air secara berkelanjutan sebelum air hasil pemulihan digunakan sebagai sumber air utama pada RAS.

Peluang integrasi yang paling prospektif dalam kerangka ekonomi sirkular adalah penggabungan constructed wetland, fitoremediasi, bioremediasi, biofilter RAS, akuaponik, dan pemulihan unsur hara dalam satu sistem terpadu. Air pascatambang terlebih dahulu dipulihkan melalui constructed wetland dan bioremediasi untuk menurunkan logam dan meningkatkan pH. Selanjutnya, air tersebut dimanfaatkan pada sistem RAS yang dilengkapi biofilter dan unit akuaponik sehingga nutrisi hasil metabolisme ikan dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Konsep ini sejalan dengan temuan Campanati et al., (2022); Handayani et al., (2020); Regueiro et al., (2022b) menyatakan bahwa limbah akuakultur dapat dikonversi menjadi sumber daya melalui daur ulang nutrisi, produksi pupuk organik, dan pemanfaatan tanaman sebagai penyerap unsur hara. Dengan demikian, aliran sumber daya menjadi lebih efisien dan menghasilkan nilai tambah ekonomi.

Meskipun demikian, beberapa tantangan masih perlu diperhatikan sebelum implementasi pada skala komersial untuk budidaya ikan di lahan pascatambang masih memerlukan uji coba jangka panjang

untuk memastikan keamanan biologis (bebas logam berat) dan kelayakan ekonomi sebelum diterapkan secara komersial (Ade Nurhayati et al., 2023; Khalik Kurniadi et al., 2023)

Secara keseluruhan, sintesis literatur menunjukkan bahwa air pascatambang batubara yang telah dipulihkan memiliki potensi tinggi untuk digunakan sebagai sumber air alternatif pada Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) dalam kerangka ekonomi sirkular. Potensi tersebut didukung oleh keberhasilan berbagai teknologi pemulihan dalam memperbaiki kualitas air, kesesuaian mekanisme biologis dengan prinsip kerja RAS, serta peluang integrasi dengan sistem pemulihan unsur hara dan akuaponik. Namun, tingkat kesiapan teknologi saat ini masih berada pada tahap transisi dari pembuktian konsep menuju implementasi operasional, sehingga diperlukan validasi teknis, biologis, dan ekonomi yang lebih komprehensif sebelum diterapkan secara luas pada industri akuakultur berkelanjutan.

Kondisi ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem terpadu antara pertambangan dan akuakultur masih memerlukan penelitian lanjutan yang menguji stabilitas kualitas air, kesehatan ikan, efisiensi biofilter, dan aspek ekonomi pada skala operasional yang lebih besar (Jacinda et al., 2021; Regueiro et al., 2022b; Yulius, 2025)

Secara keseluruhan, sintesis 23 artikel menunjukkan bahwa air pascatambang batubara yang telah dipulihkan memiliki potensi tinggi untuk digunakan sebagai sumber air alternatif pada Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) dalam kerangka ekonomi sirkular. Potensi tersebut

didukung oleh keberhasilan teknologi pemulihan dalam memperbaiki kualitas air, kesesuaian mekanisme biologis dengan prinsip kerja RAS, serta peluang integrasi dengan sistem pemulihan unsur hara dan pemanfaatan limbah. Namun, tingkat kesiapan teknologi saat ini masih berada pada tahap transisi dari pembuktian konsep menuju implementasi operasional. Oleh karena itu, pengembangan model RAS berbasis air pascatambang sebaiknya diarahkan pada sistem terpadu yang menggabungkan mine water reuse, biofilter biologis, akuaponik, dan pemulihan sumber daya sehingga mampu mendukung keberlanjutan sektor pertambangan dan akuakultur secara bersamaan dalam kerangka ekonomi sirkular.

## KESIMPULAN

Studi *Systematic Literature Review* (SLR) ini berhasil mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai strategi pemulihan air pascatambang batubara berbasis ekonomi sirkular serta potensi penerapannya pada Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) untuk budidaya ikan. Proses seleksi literatur yang mengacu pada pedoman PRISMA menghasilkan 23 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dari 90 referensi awal yang berhasil diidentifikasi. Artikel-artikel tersebut mencakup empat kelompok tema utama, yaitu pemulihan air pascatambang batubara, Sistem Resirkulasi Akuakultur (RAS) dan *water reuse*, ekonomi sirkular dan *resource recovery*, serta *nutrient recovery* dan pemanfaatan limbah.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa berbagai teknologi pemulihan, seperti fitoremediasi, bioremediasi, *constructed wetland*,

elektrokoagulasi, dan biosorben, efektif dalam meningkatkan kualitas air melalui peningkatan pH serta penurunan konsentrasi Fe dan Mn. Selain itu, terdapat kesesuaian konseptual antara mekanisme pengolahan biologis pada teknologi pemulihan air pascatambang dan prinsip biofiltrasi yang digunakan dalam sistem RAS. Temuan ini menunjukkan bahwa air pascatambang yang telah dipulihkan berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai sumber air alternatif untuk kegiatan budidaya perikanan berbasis RAS, terutama setelah melalui tahapan pengolahan dan pemantauan kualitas air yang memadai.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ade Nurhayati, Suhelmi, R., & Daramusseng, A. (2023). Analisis risiko pajanan timbal dari ikan nila di bekas tambang pada pemancing, Kerta Buana. *Sanitasi: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 16(2).  
<https://doi.org/10.29238/SANITASI.V16I2.1771>
- Adik, W., & Septiara, P. (2021). *Pedoman Praktis Penyusunan Naskah Ilmiah dengan Metode Systematic Review*.
- Adinda, K. J., Yustiati, A., & Andriani, Y. (2021). Aplikasi Teknologi Resirculating Aquaculture System (RAS) di Indonesia; A Review. *JurnalJurnal*, 11(1), 43–59.
- Andini Adi, P., Meicahayanti, I., Nugroho, S., & Zulya, F. (2023). Pengaruh Waktu Kontak serta Jenis Elektroda Al-Al dan Al-Fe pada Elektrokoagulasi dalam Penyisihan Fe dan Mn Air Asam Tambang. *Envirotek : Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), 124–128.  
<https://doi.org/10.33005/ENVIROTEK.V15I2.272>
- Arfiatia, D., Lailiyah, S., Dina, K. F., & Cokrowati, N. (2020). Dinamika Jumlah Bakteri Bacillus Subtilis dalam Penurunan Kadar Bahan Organik Tom Limbah Budidaya Ikan Lele Sangkuriang (Clarias Gariepinus). *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research*, 4(2), 222–226.  
<https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2020.004.02.6>
- Busyairi, M., Firlina, F., Sarwono, E., & Saryadi, S. (2019). Pemanfaatan Serbuk Kayu Meranti Menjadi Karbon Aktif Untuk Penurunan Kadar Besi (Fe), Mangan (Mn) Dan

- Kondisi Ph Pada Air Asam Tambang. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 11(2), 87–101.  
<https://doi.org/10.20885/jstl.vol11.iss2.art1>
- Campanati, C., Willer, D., Schubert, J., & Aldridge, D. C. (2022). Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 30(2), 143–169.  
<https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520>
- Di Vaio, A., Latif, B., Gunarathne, N., Gupta, M., & D'Adamo, I. (2024). Digitalization and artificial knowledge for accountability in SCM: a systematic literature review. In *Journal of Enterprise Information Management* (Vol. 37, Number 2, pp. 606–672). Emerald Publishing.  
<https://doi.org/10.1108/JEIM-08-2022-0275>
- Firdausi, A. P., Indriastuti, C. E., Kusumanti, I., Ramadhani, D. E., Tunisa, R. A., Maulana, A. Z. A., Sasmita, G. A. T., Rizky, M. F. A., Wiyoto, W., Adycha, P. A., & Ihsan, M. F. M. (2024). Efektivitas Budidaya Ikan Lele Dengan Recirculating Aquaculture System (Ras) Di Sujafish Farm, Kecamatan Cikole, Kota Sukabumi. *Risalah Kebijakan Pertanian Dan Lingkungan*, 11(1), 1–12.  
<https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v11i1.51105>
- Fridtriyanda, A., Sutoyo, H. D., & Herniti, D. (2022). Studi Literatur Jenis Tanaman Pengelola Air Asam Tambang Batubara Dengan Cara Fitoremediasi Pada Sistem Lahan Basah Buatan. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII) November*, 2022(November), 494–500.  
<https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/3689/1490>
- Habibullah, A., Khamidah, N., & Saputra, R. (2021). Pemanfaatan *Typha angustifolia* dan fungi mikoriza arbuskular untuk fitoremediasi air asam tambang. *Jurnal Teknologi Mineral Dan*

- Batubara*, 17(2), 95–105.  
<https://doi.org/10.30556/jtmb.vol17.no2.2021.1163>
- Handayani, M., Cahya Vikasari, & Oto Prasadi. (2020). Akuaponik sebagai Sistem Pemanfaatan Limbah Budidaya Ikan Lele di Desa Kalijaran. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Manufaktur*, 2(1), 41–50.  
<https://doi.org/10.48182/jtrm.v2i1.21>
- Ibrahim, I., Zulya, F., & Azizah, G. L. (2024). Analisis Metode Elektrokoagulasi pada Air Asam Tambang dengan Variasi Tegangan dan Jarak Elektroda. *Jurnal Reka Lingkungan*, 12(1), 25–36.  
<https://doi.org/10.26760/REKALINGKUNGAN.V12I1.25-36>
- I Dewa Gede Tresna Yudianta, N. N. D. M., & Swasta, I. B. J. (2022). Studi Perbandingan Kandungan Amonia Bebas (Nh3) Pada Budidaya Ikan Nila (*Oreochromis Niloticuss*) Dengan Menggunakan Sistem Resirkulasi Yang Berbeda. *Jurnal Ilmiah Indonesia p-ISSN:*, 33(1), 1–12.
- Jacinda, A. K., Yustiati, A., & Andriani<sup>2</sup>, Y. (2021). Aplikasi Teknologi Resirculating Aquaculture System (RAS) di Indonesia; A Review. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 11(1), 43–59.
- Khalik Kurniadi, Z., Dwi Yulianti, I., Nurwulandari, L., Dwita, D., & Apriadi, T. (2023). Konsentrasi Logam Timbel (Pb) pada Ikan Lele Budidaya di Kolong Bekas Tambang Bauksit Pulau Bintan. *Jurnal Akuatiklestari*, 7(1), 60–65.  
<https://doi.org/10.31629/AKUATIKLESTARI.V7I1.6250>
- Kisworo, Y. (2025). Literature Review Recirculating Aquaculture System (Ras) Biostimulant Critical Analysis Of Potential And Challenges In Sustainable Intensive Fish Cultivation. *Jurnal Chlorophyl*, 18(01), 1–8.
- Maharajh, D., Grewar, T., Neale, J. W., & van Rooyen, M. (2020). Mine Water. A resource for the circular economy in South African Mining communities review. *Conference: Mine Water Solutions*

- (*Vancouver*), 1–13.  
[https://www.researchgate.net/publication/342232706\\_Mine\\_Water\\_A\\_resource\\_for\\_the\\_circular\\_economy\\_in\\_South\\_African\\_Mining\\_communities\\_review](https://www.researchgate.net/publication/342232706_Mine_Water_A_resource_for_the_circular_economy_in_South_African_Mining_communities_review)
- Mochammad Ryan, H. (2023). *Luas Wilayah Pertambangan RI Capai 9,11 Juta Hektare, Ini Perinciannya - Indonesian Mining Association*. Indonesian Mining Association.  
<https://imap-api.org/luas-wilayah-pertambangan-ri-capai-911-juta-hektare-ini-perinciannya/>
- Mustikarini, N., Ikaromah, A., Supriyadi, A., Nugraha, T. A., & Azzam Ma'ruf, N. (2022). Pengaruh Variasi Komposisi Dekomposer EM4 dan Molase pada Pembuatan Pupuk Organik Cair dari Limbah Budidaya Lele. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 4(1), 47–52.  
<https://ejournal.pnc.ac.id/index.php/jppl>
- Noer, M. N. K., Pratiwi, A. H., Abidin, Z., Setiawan, A., & Cahyani, D. N. A. (2025). Pengaruh Pemberian Air Limbah Budidaya Ikan Lele terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawi (*Brassica juncea* L.). *Plumula : Berkala Ilmiah Agroteknologi*, 13(1), 1–6.  
<https://doi.org/10.33005/plumula.v13i1.238>
- Norfaeda, R., & Kartini. (2024). Pengolahan Air Limbah Tambang Menggunakan Limbah Kulit Langsung: Penurunan Kadar Logam Total Fe dan Mn. *Jurnal Geomine*, 12, 152–162.
- Perala, I., Yani, M., & Mansur, I. (2022). Bioremediasi air asam tambang batubara dengan pengayaan bakteri pereduksi sulfat dan penambahan substrat organik. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 18(2), 81–95.  
<https://doi.org/10.30556/jtmb.vol18.no2.2022.1232>
- Regueiro, L., Newton, R., Soula, M., Méndez, D., Kok, B., Little, D. C., Pastres, R., Johansen, J., & Ferreira, M. (2022a). Opportunities and limitations for the introduction of circular economy principles in EU aquaculture based

- on the regulatory framework. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2033–2044. <https://doi.org/10.1111/jiec.13188>
- Regueiro, L., Newton, R., Soula, M., Méndez, D., Kok, B., Little, D. C., Pastres, R., Johansen, J., & Ferreira, M. (2022b). Opportunities and limitations for the introduction of circular economy principles in EU aquaculture based on the regulatory framework. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2033–2044. <https://doi.org/10.1111/jiec.13188>
- Sandrawati, A., Darmawan, D., Suryaningtyas, D. Tj., & Djadjakirana, G. (2018). Potensi Pemanfaatan Tanaman *Thypha sp* dan *Cyperus sp* dalam Proses Remediasi Air Asam Tambang dengan Sistem Rawa Buatan. *SoilREns*, 16(1), 14–19. <https://doi.org/10.24198/soilrens.v16i1.18292>
- Sandrawati, A., Suryatmana, P., Putra, I. N., & Kamaluddin, N. N. (2019). Pengaruh Jenis Bahan Organik dan Bakteri Pereduksi Sulfat Terhadap Konsentrasi Fe dan Mn dalam Remediasi Air Asam Tambang. *Soilrens*, 17(1), 38–44.
- Tyas, B., Rukmana, S., Haq, S. R., & Lusantono, O. W. (2026). Desain Konstruksi Wetland untuk Pengelolaan Air Asam Tambang di Void Pasca Tambang Batubara. *Kurvatek*, 11(1), 19–28. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v11i1.6136>
- Usman, H., & Bulan, M. T. (2024). Respon Pelaku Usaha Budidaya Lele terhadap Penyuluhan Agribisnis Sirkular: Studi Pemanfaatan Limbah Air Budidaya Menjadi Pupuk Cair di Kelurahan Lasiana, Kota Kupang. *Urnal Pembangunan Perikanan Dan Agribisnis*, 13(1), 44–62.
- Yudiana, I. D. G. T., Martini, N. N. D., & Swasta, I. B. J. (2022). Studi Perbandingan Kandungan Amonia Bebas (NH<sub>3</sub>) pada Budidaya Ikan Nila (*oreochromis niloticus*) Dengan Menggunakan Sistem Resirkulasi yang Berbeda I. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(7), 9009–9015.

Yulius, K. (2025). Literatur Review  
Recirculating  
Aquaculture System  
(RAS) Biostimulan  
Analisis Kritis Potensi  
Serta Tantangan dalam

Budidaya Ikan Intensif  
yang Berkelanjutan. In  
*Jurnal Chlorophyl*  
(Vol. 18).