

Bioremediasi Berbasis Zonasi Menggunakan Konsorsium Agen Biologis untuk Pengelolaan Eutrofikasi di Danau Batur: Sebuah Ulasan Naratif

Ni Kadek Sri Widiastuti ^a, Pande Made Shidinata Hardynugraha ^{a*}, I Dewa Agung Panji Dwipayana ^a, Luh Putu Eswaryanti Kusuma Yuni ^a

^a Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit UNUD, Jimbaran, Kec. Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Provinsi Bali-Indonesia

*Email: hardynugraha.2508531045@student.unud.ac.id

Diterima (received) 7 Juli 2026; disetujui (accepted) 31 Juli 2026; tersedia secara online (available online) 10 Agustus 2026

Abstract

Lake Batur is experiencing severe ecological degradation due to accelerated eutrophication driven by massive organic loading and nutrient enrichment from non-point source anthropogenic activities. This narrative review aims to synthesize empirical evidence on the efficacy of bioremediation agents and formulate targeted aquatic restoration strategies. The synthesis reveals that the simultaneous application of a multi-biological consortium (heterotrophic bacteria, photosynthetic microalgae, and littoral macrophytes) exhibits superior nutrient reduction and organic carbon degradation via a mutualistic, closed-loop system compared to single-species setups. As a tactical solution, this study proposes a novel zone-based operational framework that divides Lake Batur into four distinct biocontrol intervention clusters: the Littoral Zone, Limnetic-Cage Aquaculture (KJA) Zone, Weed-Impacted Coastal Zone, and Anthropogenic Hubs. The practical implication of this framework provides lake managers with a precise decision-making matrix to deploy eco-technologies directly at pollutant sources, including installing floating bio-filter mats around aquaculture zones and constructing wetlands along coastlines. However, as most data originate from controlled setups, executing direct in-situ field validation remains a primary limitation and a mandatory prerequisite to evaluate the consortium's resilience against the real environmental fluctuations of the volcanic caldera before macro-scale implementation.

Keywords: Lake Batur; bioremediation consortium; nutrient reduction; zone-based framework; field validation)

Abstrak

Danau Batur mengalami degradasi ekologis akibat akselerasi eutrofikasi yang dipicu oleh akumulasi limbah organik dan pengayaan nutrisi dari aktivitas antropogenik non-komunal. Tinjauan naratif ini bertujuan menyintesis bukti empiris mengenai efektivitas agen bioremediasi dan merumuskan strategi pemulihan perairan terarah. Hasil sintesis menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium biologis lintas taksa (bakteri heterotrof, mikroalga fotosintetik, dan makrofit litoral) secara simultan menunjukkan performa pengurangan nutrisi dan degradasi karbon organik yang jauh lebih unggul melalui sistem mutualistik lingkaran-tertutup (*closed-loop system*) dibandingkan aplikasi spesies tunggal. Sebagai solusi taktis, studi ini mengusulkan sebuah kerangka kerja operasional baru berbasis zonasi spasial yang membagi Danau Batur menjadi empat kluster intervensi biokontrol spesifik: Zona Litoral, Zona Limnis Keramba Jaring Apung (KJA), Zona Pesisir Dampak Gulma, dan Zona Pusat Antropogenik. Implikasi praktis dari zonasi ini memberikan matriks keputusan bagi pengelola danau untuk menempatkan teknologi ramah lingkungan secara presisi pada sumber pencemar, seperti pemasangan *floating* bio-filter mat di area perikanan dan pembangunan *constructed wetlands* di sempadan perairan. Namun, karena mayoritas data berbasis pada kondisi terkontrol, pelaksanaan validasi lapangan langsung (*in-situ pilot project*) tetap menjadi batasan studi sekaligus prasyarat wajib untuk menguji ketahanan

doi: <https://doi.org/10.24843/bljc.2026.v26.i02.p02>



© 2019 by the authors; Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI. Published under licence by Udayana University, Indonesia.

konsorsium terhadap fluktuasi lingkungan nyata kaldera vulkanik sebelum diimplementasikan secara makro.

Kata Kunci: Danau Batur; konsorsium bioremediasi; pengurangan nutrisi; kerangka kerja zonasi; validasi lapangan

1. Pendahuluan

Danau Batur merupakan ekosistem kaldera vulkanik di Bali yang memiliki nilai strategis penting, baik sebagai sumber daya hidrologi utama, pusat perikanan budidaya, maupun destinasi ekowisata prioritas (Agustonia & Aprinica, 2022; Sunaryani dkk., 2024; Harlianti dkk., 2026). Namun, dalam beberapa dekade terakhir, Danau Batur telah mengalami tekanan lingkungan intensif akibat lonjakan aktivitas antropogenik di sekitar daerah tangkapan air. Aktivitas pertanian hortikultura di dataran tinggi Kintamani, perikanan budidaya lewat Keramba Jaring Apung (KJA), peternakan, domestik, serta sektor pariwisata menjadi kontributor utama masuknya polutan ke badan air (Bahri, 2016; Sani dkk., 2024; Utama dkk., 2024). Input antropogenik non-komunal ini secara konstan mengalirkan kontaminan dalam volume besar langsung menuju badan air danau tanpa pengolahan awal yang memadai, sehingga memicu penurunan kualitas lingkungan perairan secara signifikan (Prasetyo dkk., 2025).

Akumulasi buangan dari berbagai sumber tersebut memicu peningkatan drastis konsentrasi parameter pencemar utama, terutama nutrisi makro berupa fosfat (Total *Phosphorus*/TP) dan nitrogen (Total Nitrogen/TN) yang melampaui baku mutu (Almalia dkk., 2025). Berdasarkan hasil penelitian oleh Sani dkk., (2024) mengenai kualitas air dan pencemaran nutrisi di Danau Batur, konsentrasi TP pada air Danau Batur telah mencapai rentang tinggi yaitu 0,07–0,97 mg/L, sementara konsentrasi TN berada pada rentang 0,19–2,21 mg/L. Lebih lanjut, identifikasi beban pencemaran menunjukkan bahwa aktivitas pertanian menjadi penyumbang utama beban P tertinggi mencapai 91,69%, sementara aktivitas perikanan KJA menjadi kontributor utama beban N tertinggi sebesar 45,19% (Sani dkk., 2024). Penelitian lain yang dilakukan Sunaryani dkk., (2024) mengenai eutrofikasi di Danau Batur, menunjukkan hasil mendukung bahwa limbah pertanian menjadi sumber dominan nutrisi nitrogen (93.05 %) dan fosfat (89.96 %).

Kelebihan input nutrisi makro dari kedua sektor dominan ini memicu kondisi eutrofikasi akut yang mendorong ledakan populasi alga (*algae blooming*) yang dapat memicu *harmful algal blooms* (HABs) (Setiawan dkk., 2026). Fenomena *algal blooming* berdampak pada penurunan penetrasi cahaya matahari ke dalam kolom air serta deplesi kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*/DO) secara drastis yang memicu fase hipoksia hingga anoksia (Gong dkk., 2017; Prasetyo dkk., 2025). Kondisi penurunan kualitas air dan defisiensi oksigen yang parah pada kolom serta sedimen air akan mengancam kelangsungan hidup biota perairan asli dan memicu kerentanan ekosistem terhadap fenomena kematian ikan massal (Gong dkk., 2017; Griffith & Gobler, 2020). Upaya pemulihan air danau secara konvensional melalui pendekatan fisik dan kimia memerlukan biaya operasional yang sangat besar, sehingga sulit diterapkan pada badan air skala makro secara berkelanjutan. Sebagai alternatif, bioremediasi menggunakan konsorsium agen biologis (bakteri, fungi, mikroalga, dan tanaman makrofit) diakui sebagai solusi berbasis alam (*nature-based solution*) yang ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan (Bai dkk., 2025; Efremenko dkk., 2024).

Sinergisme lintas kelompok organisme ini mampu mempercepat degradasi limbah organik dan asimilasi nutrisi secara simultan melalui hubungan mutualisme sistem lingkaran tertutup (*closed-loop system*) (Ameen, 2023; Vo dkk., 2024). Integrasi mikroalga dan bakteri, misalnya, memfasilitasi pertukaran oksigen hasil fotosintesis dan karbon dioksida hasil respirasi yang secara efektif meningkatkan penyisihan polutan organik serta nutrisi (Vo dkk., 2024). Selain itu, penggunaan konsorsium bakteri-fungi dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi degradasi polutan kompleks pada air limbah, sementara pelibatan fungi dalam konsorsium buatan menawarkan ketahanan yang tinggi terhadap cekaman lingkungan ekstrem (Ameen, 2023; Efremenko dkk., 2024). Namun, penting untuk digaris bawahi bahwa potensi reduksi beban organik karbon seperti BOD dan COD hingga di atas 75% serta penyisihan amonia bebas hingga mencapai 92% merupakan bukti empiris yang dilaporkan secara spesifik di bawah kondisi laboratorium yang dioptimalkan secara ketat, mesokosmos, atau bioreaktor terkontrol (Ameen, 2023; Vo dkk., 2024). Nilai-nilai efisiensi yang tinggi ini bukanlah hasil yang dijamin secara instan untuk diaplikasikan pada Danau

Batur, sehingga proses validasi lapangan dan uji coba adaptasi agen biologis masih mutlak diperlukan akibat dinamisnya faktor abiotik alami serta interaksi biotik di lingkungan terbuka (Bai dkk., 2025; Efremenko dkk., 2024).

Meskipun potensi dari masing-masing agen biologis telah banyak dieksplorasi secara terpisah pada skala laboratorium, dokumentasi ilmiah yang mengintegrasikan agensi hayati ini ke dalam sistem pengelolaan spasial danau tropis masih sangat terbatas. Kebaruan (*novelty*) dari tinjauan naratif ini adalah penyusunan kerangka kerja bioremediasi berbasis zonasi yang dirancang secara spesifik untuk Danau Batur dengan mengintegrasikan data karakteristik polusi lokal dan potensi konsorsium hayati pelaksana (Ameen, 2023; Bai dkk., 2025; Efremenko dkk., 2024; Vo dkk., 2024). Tinjauan ini menghubungkan secara terpadu antara sumber polusi spesifik di Danau Batur, zona spasial danau, jenis konsorsium agen biologis yang dibutuhkan, mekanisme interaksi biokimia, serta parameter kualitas air yang ditargetkan. Tujuan utama dari manuskrip ini adalah menyintesis bukti empiris dari studi bioremediasi terdahulu dan mengusulkan *draft* kerangka kerja fungsional berbasis zonasi sebagai instrumen taktis bagi pemulihan kualitas air dan pengelolaan eutrofikasi Danau Batur.

2. Metode Penelitian

2.1. Desain Studi dan Strategi Penelusuran Literatur

Penelitian ini menggunakan metode *narrative literature review* (tinjauan literatur naratif) yang dirancang secara sistematis mengikuti panduan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) yang telah dimodifikasi (Dwipayana dkk., 2026), untuk menyusun analisis kritis mengenai efektivitas konsorsium agen biologis dalam meremediasi perairan eutrofik. Penelusuran artikel ilmiah dilakukan secara komprehensif pada Januari–Februari 2026 melalui tiga pangkalan data akademis utama, yaitu Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect. Strategi pencarian literatur menggunakan kombinasi kata kunci dan operator Boolean sebagai berikut: ("Bioremediasi Danau" OR "Lake Bioremediation") AND ("Konsorsium Mikroba" OR "Microbial Consortium") AND ("Eutrofikasi" OR "Eutrophication") AND ("Agen Biologis" OR "Biological Agents"). Rentang tahun publikasi dibatasi pada artikel yang terbit dalam 10 tahun terakhir (2016–2026) guna menjamin kebaruan data.

2.2. Kriteria Inklusi, Eksklusi, dan Proses Penyaringan

Proses seleksi literatur dilakukan melalui penyaringan bertahap untuk menjaga relevansi materi terhadap rona lingkungan Danau Batur berdasarkan alur panduan PRISMA termodifikasi (Dwipayana dkk., 2026). Kriteria inklusi meliputi:

1. Artikel jurnal ilmiah primer (orisinal penelitian) berskala nasional maupun internasional yang berfokus pada aplikasi bioremediasi agen biologi (bakteri, mikroalga, makrofit) secara mandiri atau konsorsium.
 2. Artikel yang menyajikan data kuantitatif reduksi parameter kualitas air perairan tergenang (BOD, COD, Amonia, Nitrat, Fosfat, atau DO).
 3. Artikel yang memiliki keterkaitan aplikasi ekologis untuk tipe danau tropis atau vulkanik
- Sementara itu, kriteria eksklusi yang diterapkan adalah:
1. Artikel berbentuk ulasan buku, abstrak prosiding pendek, riset sekunder, atau laporan teknis instansi.
 2. Penelitian bioremediasi yang berfokus pada limbah industri berat (logam berat spesifik industri, tekstil, petrokimia) atau limbah padat daratan yang tidak merepresentasikan karakteristik limbah antropogenik domestik, pariwisata, KJA, dan pertanian di Danau Batur.

Melalui penelusuran awal menggunakan sintaks pencarian di atas, ditemukan total 35 artikel yang memenuhi parameter kata kunci dasar. Seluruh artikel tersebut kemudian ditapis secara ketat berdasarkan kesesuaian kriteria inklusi dan eksklusi. Pada tahap penyaringan pertama dianalisis berdasarkan abstrak dan metodologi di mana sebanyak 15 artikel dieliminasi karena berstatus riset sekunder atau laporan teknis serta tidak menyajikan data kuantitatif parameter kualitas air pada ekosistem danau, sehingga tersisa 20

artikel yang dieksplorasi sebagai basis pengetahuan makro mengenai status trofik ekosistem sejenis. Selanjutnya, pada tahap penyaringan kedua dianalisis berdasarkan analisis teks utuh (*full-text*), sebanyak 5 artikel dieliminasi karena tidak menyajikan data spesifik mengenai aplikasi konsorsium multi-taksa. Dengan demikian, diperoleh 15 artikel unggulan sebagai final yang paling relevan dan representatif untuk dianalisis secara mendalam.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Matriks Data Pendukung Bioremediasi

Hasil penapisan 15 artikel referensi utama yang mengkaji performa kinetika pertumbuhan dan kapasitas degradasi agen biologis dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Sintesis Bukti Empiris Agen Bioremediasi (*Narrative Review*)

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
Tema 1: Sinergi Mikroalga-Bakteri	Hering-Peter dkk. (2026)	Characterization of flocc-forming, fast-sedimenting microalgae-bacteria consortia used for low-cost biomass harvesting in chemostatic bioreactors	Seleksi sampel lingkungan, karakterisasi fisik (flok & sedimentasi), visualisasi SEM, dan sekuensing metagenomik WGS.	Interaksi MBC menstimulasi EPS membentuk flok besar ($417,59 \pm 21,8 \mu\text{m}$) dengan kecepatan endap tinggi ($4,16 \pm 0,52 \text{ m/jam}$) tergantung jenis dan karakteristik limbah.	Mengatasi keterbatasan pemanenan biomassa ekonomis di Danau Batur. Efektif mengolah fluktuasi limbah perikanan (<i>Chlorella-Cyanobium</i>) dan limpasan pertanian (<i>Fragilaria</i>).
	Vo dkk. (2024)	Microalgae-bacteria consortia for organic pollutants remediation from wastewater: A critical review	Tinjauan literatur mekanisme degradasi polutan (biosorpsi, bioakumulasi, enzimatik) dan analisis berbasis omiks.	Jalur pembersihan polutan organik melalui biosorpsi alga dan degradasi enzimatik bakteri. Konsorsium tahan terhadap cekaman lingkungan terbuka.	Menunjukkan konsorsium adaptif dan tahan terhadap paparan residu pestisida hortikultura Kaldera Batur, sehingga asimilasi hara tetap berjalan stabil.

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
Tema 2: Degradasi Bakteri Bahan Organik	Zhao dkk. (2025)	Harnessing an Algae-Bacteria Symbiosis System: Innovative Strategies for Enhancing Complex Wastewater Matrices Treatment	Critical review transfer massa, metabolisme sirkular, dan optimasi parameter operasional sistem ABS.	Sinergisme sirkular alga-bakteri (pertukaran O_2 , CO_2 , vitamin, dan zat pengatur tumbuh) meningkatkan efisiensi penyisihan polutan organik, nitrat, dan fosfat hingga lebih dari 80%.	Solusi reduksi <i>over-capacity</i> N dan P di Danau Batur secara biologis tanpa ketergantungan pada aerasi mekanis yang tinggi konsumsi listrik.
	Javed dkk. (2026)	Microalgae-bacteria consortia for efficient FOG removal from real municipal wastewater	Eksperimen reaktor botol 1000 mL (monokultur vs konsorsium <i>C. vulgaris</i> + bakteri indigenus), optimasi RSM-BBD, dan analisis 16S rRNA.	Biomassa konsorsium tertinggi ($857,5 \pm 35,6 \text{ mg/L}$) dengan degradasi FOG $95,2 \pm 1,1\%$, (bakteri tunggal $24,3\%$) serta dominasi <i>Cyanophyceae</i> 90,8%.	Reduksi polutan organik, lemak, dan minyak (FOG) dari limbah domestik perhotelan/restoran di zona pariwisata Danau Batur.
	Perales-Pérez dkk. (2023)	Process for nutrient recycling from intensive aquaculture through microalgae-bacteria consortium	Reaktor semi-pilot (<i>batch</i> & semi-kontinu), pemanenan via koagulasi-flokulasi-sedimentasi, dan filtrasi pasir halus.	Reduksi konstan 52%–97% total hara perikanan via degradasi bakteri serta <i>nutrient recycling</i> menjadi biomassa kaya protein.	Mengatasi akumulasi limbah sisa pakan dan feses di zona budidaya KJA Danau Batur melalui daur ulang nutrien.
	Mazurkiewicz dkk., (2020)	The Process of	Kajian pustaka sistematik data	Reduksi BOD_5 ($< 5 \text{ mg/L}$),	Solusi akumulasi

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
		Microbiological Remediation of the Polluted Sloneczko Reservoir in Poland: For Reduction of Water Pollution and Nutrients Management	sekunder respons keanekaragaman mikroalga terhadap fluktuasi parameter fisika-kimia air.	COD (16 – 25 mg/L), dan lumpur dasar (20 – 50 cm). Kombinasi makrofit litoral memangkas TN dan TP hingga 50%.	sedimen KJA/pertanian Batur via aplikasi zonasi (air-sedimen). Menegaskan pentingnya vegetasi litoral (<i>ecotone</i>) guna mencegah eutrofikasi sekunder.
Tema 3: Asimilasi Nutrisi Mikroalga	Ramadhaniaty & Widyastuti (2025)	Keanekaragaman mikroalga dan fungsinya sebagai bioindikator dalam ekosistem perairan sungai	Kajian pustaka sistematik data sekunder respons keanekaragaman mikroalga terhadap fluktuasi fisika-kimia air.	Diatom dan <i>Cyanobacteria</i> responsif mengasimilasi hara; dominasi spesies tertentu berkorelasi langsung dengan pengayaan nitrogen dan fosfat.	Rujukan pemanfaatan mikroalga indigenus sebagai bioindikator alami pemantauan status trofik dan polusi di Danau Batur.
Tema 4: Retensi Nutrisi Berbasis Makrofit	Khasanah & Handayani (2025)	Artikel Review: Potensi Tanaman dalam Bioremediasi Perairan Tercemar Limbah Industri dan Domestik	Tinjauan sistematis 11 artikel lapangan, mengevaluasi model fitoremediasi <i>batch</i> , <i>continuous</i> , <i>constructed wetlands</i> , dan biofilter.	Makrofit air (<i>S. molesta</i> , <i>I. crassicaulis</i> , <i>E. crassipes</i> , <i>A. pinnata</i>) memiliki retensi hara dan logam berat tinggi via akar serabut.	Pemanenan vegetasi litoral lokal untuk mereduksi <i>runoff</i> fosfat pertanian hortikultura sebelum masuk ke zona tengah Danau Batur.
Tema 5: Karakteristik Ekologis Danau	Sani dkk. (2024)	Identifikasi Kualitas Air dan Pencemaran Nutrien di Danau Batur	<i>Monitoring</i> 11 stasiun, analisis TP & TN via Spektrofotometri UV-Vis (<i>combine reagents</i>), dan	TP0,07 – 0,97 mg/L dan TN 0,19 – 2,21 mg/L di atas baku mutu.	Data kuantitatif keparahan eutrofikasi sekaligus basis zonasi

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
		dari Parameter Total Fosfat dan Total Nitrogen	perhitungan beban pencemaran hulu-hilir.	Pertanian menyumbang 91,69% beban TP; KJA menyumbang 45,19% beban TN.	intervensi bioremediasi target hara spesifik (N dan P).
	Prasetyo dkk. (2025)	Assessment of Water Pollution Levels in Lake Batur, Indonesia and their Effect on Water Weed Presence	Analisis spasial kualitas air, korelasi indeks polusi dengan makrofit invasif, dan deplesi DO kolom sedimen.	Polusi antropogenik memicu eutrofikasi (<i>algae blooming & gulma air</i>), menurunkan penetrasi cahaya, dan menyebabkan anoksia memicu kematian massal ikan.	Menjelaskan korelasi spasial eutrofikasi dengan penurunan DO (anoksia) yang secara historis memicu kematian massal ikan KJA Batur.
	Suryani dkk. (2025)	Ecological diagnosis of Lake Batur (Bali, Indonesia) post-disturbance using multimetric phytoplankton indices	Sampling plankton pasca-gangguan, analisis struktur komunitas, dan perhitungan indeks multimetrik fitoplankton Danau Batur.	Eutrofikasi menggeser struktur komunitas fitoplankton indigenus, ditandai dominasi mikroalga bioindikator polusi sedang-berat di zona litorat.	Menunjukkan tingkat degradasi biodiversitas asli danau; mendasari perlunya rekayasa komunitas via bioremediasi untuk pemulihan spesies indigenus.
	Widyasari dkk. (2024)	Lake Batur water quality analysis through Storet method as an	Klasifikasi mutu air metode STORET (11 parameter) pada 3 lokasi (Songan, Toya Bungkah,	Songan (skor - 4 / tercemar ringan), Toya Bungkah (skor -8 / tercemar ringan),	Konfirmasi penurunan mutu air lokal di Songan dan Toya

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
		effort to control lake water pollution	Kedisan) dipadukan dengan analisis SWOT.	Kedisan (Baku Mutu Kelas 3). Parameter pembatas: Coliform, fosfat, BOD.	Bungkah; mendasari kebutuhan intervensi bioremediasi zonasi berbasis parameter pembatas spesifik.
	Nuringtyas dkk. (2023)	Study of water degradation due to community activities in The Lake Batur ecosystem, Bangli District, Bali	Pemetaan tata guna lahan, uji laboratorium 11 sampel perimeter, analisis indeks NSF-WQI, dan wawancara sosiologis.	Konversi lahan sempadan dan buangan limbah domestik non-komunal tanpa pengolahan berkorelasi langsung dengan degradasi air serta sedimentasi.	Justifikasi keterkaitan erat sedimentasi Batur dengan aktivitas domestik pesisir yang mendasari perlunya intervensi bioremediasi di zona perimeter pemukiman tepi danau.
	Pereira & Mulligan (2023)	Practices for Eutrophic Shallow Lake Water Remediation and Restoration: A Critical Literature Review	<i>Critical review</i> skala global membandingkan restorasi fisik, kimia, biomanipulasi, ekorekayasa, serta analisis keberlanjutan ekonomi-energi.	Pemulihan fisik-kimia konvensional tidak berkelanjutan (mahal dan merusak ekosistem). Intervensi biologi/ekorekayasa terpadu efektif untuk jangka panjang.	Menolak opsi fisik-kimia konvensional di Danau Batur karena tidak efisien; memperkuat adopsi bioremediasi sebagai pendekatan berbasis alam (<i>nature-based solutions</i>).
	Kaur (2020)	Bio-manipulation: A restoration tool for	Tinjauan pustaka teknik biomanipulasi <i>top-down</i> dan <i>bottom-</i>	Manipulasi struktur trofik (menekan ikan planktivor)	Acuan regulasi <i>restocking</i> jenis ikan di

Tema Fungsional / Karakteristik	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Metode Referensi	Ringkasan Hasil	Relevansi bagi Danau Batur
		eutrophied lakes	up pada ekosistem limnetik.	meningkatkan kelimpahan zooplankton sebagai kontrol hayati berkelanjutan terhadap <i>algal blooming</i> .	Danau Batur guna menata rantai makanan sebagai strategi pendukung kontrol <i>blooming</i> alga.

3.2. Sintesis Tematis Performa Agen Bioremediasi

3.2.1. Degradasi

Beban karbon organik terlarut yang berasal dari akumulasi feses ekskresi ikan dan sisa pakan komersial KJA memicu deoksigenasi parah pada sedimen dasar Danau Batur, sebuah kondisi degradasi perairan yang jamak dipicu oleh tingginya aktivitas antropogenik masyarakat di sekitar ekosistem danau (Nuringtyas dkk., 2023). Bukti kuat dari pengujian skala laboratorium menunjukkan bahwa isolat bakteri heterotrofik indigen memiliki kapasitas superior dalam mensekresi enzim hidrolitik ekstraseluler (amilase, protease, dan lipase) untuk memutus rantai karbon kompleks polutan organik tersebut. Pola kinetika degradasi oleh bakteri heterotrofik ini mampu menghasilkan persentase reduksi polutan organik yang signifikan di bawah kondisi eksperimental yang diatur secara ketat.

Sebagai gambaran komparatif dari studi terkontrol, optimasi agen biologis heterotrofik mampu menunjukkan potensi penurunan parameter *Biological Oxygen Demand* (BOD) hingga mencapai 82% serta *Chemical Oxygen Demand* (COD) hingga 75% (Mazurkiewicz dkk., 2020; Vo dkk., 2024). Namun, nilai-nilai efisiensi tinggi tersebut harus disajikan secara spesifik sebagai bukti dari batas studi eksperimental terkontrol, bukan sebagai hasil akhir yang langsung dijamin pada fluktuasi lapangan Danau Batur. Validasi nyata di lapangan terbuka mutlak diperlukan karena kelemahan utama dari aplikasi bakteri heterotrofik mandiri adalah sifat dekomposisinya yang mengkonsumsi oksigen terlarut, sehingga jika diaplikasikan tanpa agen penyokong, justru berpotensi memperparah kondisi hipoksia pada kolom air perairan tergenang (Javed dkk., 2026).

3.2.2. Asimilasi Nutrien oleh Mikroalga Fotosintetik

Pengayaan makronutrien nitrogen dan fosfat anorganik merupakan faktor pemicu utama fenomena *algal blooming*, penurunan kualitas air, hingga memicu ledakan populasi gulma air di Danau Batur (Prasetyo dkk., 2025; Sani dkk., 2024). Spesies mikroalga fotosintetik diidentifikasi sebagai asimilator ortofosfat dan interseptor nitrat yang sangat efisien melalui mekanisme transpor aktif menembus membran sel untuk sintesis protein internal (Perales-Pérez dkk., 2023). Di samping itu, keunggulan metabolisme seluler mikroalga adalah kemampuannya menyerap gas karbon dioksida (CO₂) hasil respirasi perairan untuk dikonversi menjadi biomassa melalui fotosintesis (Hering-Peter dkk., 2026).

Proses fiksasi karbon ini menghasilkan produk sampingan berupa pasokan oksigen fungsional terlarut yang melimpah, dengan potensi pemulihan *Dissolved Oxygen* (DO) hingga mencapai fase super-saturasi di atas 8 mg/L di bawah pemodelan kondisi reaktor uji terkontrol (Hering-Peter dkk., 2026; Perales-Pérez dkk., 2023). Angka pemulihan DO yang tinggi tersebut wajib disikapi secara hati-hati sebagai performa potensial berskala laboratorium, mengingat kondisi riil ekosistem Danau Batur sangat dipengaruhi oleh

dinamika iklim makro dan gangguan ekologis lokal (Suryani dkk., 2025). Pembatasan teknis pada sistem monofilik alga terletak pada risiko tingginya sensitivitas terhadap kejutan beban polutan organik berlebih yang dapat menghambat penetrasi cahaya untuk fotosintesis.

3.2.3. Retensi Nutrien Makrofit Zona Litoral

Vegetasi makrofit memiliki peran penting sebagai barier bioretensi alami pada kawasan transisi darat-air (litoral) Danau Batur untuk menahan limpasan limbah pupuk dari sektor pertanian (Sani dkk., 2024). Pendekatan restorasi pada danau dangkal atau kawasan litoral yang mengalami eutrofikasi parah dapat dioptimalkan melalui pengelolaan struktur trofik dan vegetasi melalui teknik biomanipulasi ekologis. Komponen tanaman makrofit bekerja melalui sistem filtrasi fisik interseptor partikulat padat (Total *Suspended Solids*/TSS) dan absorpsi makronutrien secara bioakumulasi pada jaringan akar-rizoma (Pereira & Mulligan, 2023).

Bukti empiris dari pemodelan sistem *constructed wetlands* menunjukkan bahwa interseptor vegetasi ini mampu meretensi akumulasi senyawa nitrat dan fosfat dalam kisaran potensi estimasi 70–85% di bawah kondisi uji mesokosmos yang stabil (Mazurkiewicz dkk., 2020). Area perakaran makrofit juga menyediakan luasan substrat penempelan alami bagi biofilm perifiton mikroba yang berkontribusi pada proses denitrifikasi. Namun, retensi makrofit memiliki kelemahan inheren berupa laju penyerapan yang lambat (mengikuti siklus pertumbuhan vegetatif tanaman) dan risiko pelepasan kembali nutrien ke badan air apabila biomassa tanaman yang menua dibiarkan mati membusuk di dalam danau tanpa manajemen pemanenan yang tepat (Pereira & Mulligan, 2023).

3.2.4. Sinergisme Mutualistik Konsorsium Mikroalga-Bakteri

Kelemahan sistem spesies tunggal dapat dieliminasi secara total melalui pembentukan aliansi lintas taksa dalam sistem konsorsium multi-biologis terpadu, seperti pemanfaatan konsorsium mikroalga-bakteri (Hering-Peter dkk., 2026). Hubungan interaksi biokimia yang terbentuk merupakan suatu siklus lingkartertutup (*closed-loop system*) yang saling mendukung (Vo dkk., 2024). Bakteri heterotrofik merombak bahan organik sisa pakan KJA dan menghasilkan CO₂ serta amonium bebas (Vo dkk., 2024). Gas CO₂ tersebut langsung diasimilasi oleh komponen mikroalga fotosintetik, yang secara simultan menyuplai balik gas O₂ hasil fotosintesis untuk mendukung kebutuhan respirasi aerobik bakteri pengurai (Hering-Peter dkk., 2026).

Mekanisme estafet yang krusial terjadi pada siklus nitrogen: gas amonia bebas (NH₃) yang bersifat toksik bagi biota perairan dioksidasi menjadi nitrat melalui proses nitrifikasi oleh bakteri, yang kemudian diserap secara instan oleh komponen mikroalga (*co-culture*) sebagai sumber nitrogen pertumbuhan (Vo dkk., 2024). Sinergisme ini terbukti sangat efisien dalam menurunkan polutan utama dengan potensi penyisihan amonia bebas mencapai 92% pada kondisi eksperimental terkontrol (Perales-Pérez dkk., 2023). Kendati demikian, efisiensi reduksi 92% ini harus ditegaskan sebagai performa potensi maksimal di dalam bioreaktor laboratorium, di mana pemanenan biomassa dan flokulasinya berjalan konstan (Hering-Peter dkk., 2026).

Pada skala riil terbuka Danau Batur, implementasi agen konsorsium ini masih memerlukan validasi lapangan lanjutan demi menghadapi ketidakpastian iklim (Suryani dkk., 2025). Melalui pemahaman mekanisme komparatif ini, integrasi konsorsium mikroalga-bakteri dan makrofit litoral tidak hanya menekan laju pertumbuhan gulma air (Prasetyo dkk., 2025), tetapi juga memberikan basis ilmiah yang kokoh dalam penyusunan kerangka zonasi wilayah bioremediasi yang fungsional bagi Danau Batur ke depan (Pereira & Mulligan, 2023; Widyasari dkk., 2024).

3.3. Kerangka Kerja Bioremediasi Berbasis Zonasi Danau Batur

Sebagai instrumen pemecahan masalah yang operasional, seluruh bukti mekanisme interaksi agen biologis yang telah disintesis di atas diintegrasikan ke dalam sebuah model spasial terarah. Pendekatan zonasi ini dirancang untuk mengatasi tantangan ekologis secara spesifik pada tiap area terdampak di Danau Batur, mulai dari wilayah pesisir akibat limpasan pertanian hingga area budidaya jaring apung (KJA)

(Nuringtyas dkk., 2023; Prasetyo dkk., 2025; Sani dkk., 2024). Pembagian klaster operasional, sasaran polutan dominan, konfigurasi agensi biologis, serta proyeksi potensinya disajikan secara rinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Sintesis Bukti Empiris Agen Bioremediasi (Narrative Review)

Kluster Spasial Danau	Sumber Polusi Dominan	Parameter Kualitas Air Target	Konfigurasi Agen Biologis Pilihan	Mekanisme Interaksi Utama	Potensi Reduksi Berdasarkan Bukti Empiris
Zona Litoral (Pesisir Dangkal & Pinggiran)	Limpasan permukaan (<i>surface runoff</i>) pupuk pertanian hortikultura Kintamani (Sani dkk., 2024).	Nitrat (NO ₃ ⁻), Fosfat (PO ₄ ³⁻), Padatan Tersuspensi (TSS).	Vegetasi makrofit lokal (<i>Typha</i> sp.) terintegrasi bakteri perifiton area perakaran.	Barrier bio-retensi (<i>constructed wetlands</i>); absorpsi akar dan filtrasi fisik partikulat (Pereira & Mulligan, 2023).	Potensi Laboratorium/Mesosokos mos: Retensi senyawa nitrat ± 70% dan fosfat 85% pada uji skala stabil; validasi fluktuasi lapangan riil masih diperlukan (Mazurkiewicz dkk., 2020; Pereira & Mulligan, 2023).
Zona Limnis (Kawasan Budidaya KJA)	Sisa pakan komersial berlebih dan sekresi fekal ikan (Nuringtyas dkk., 2023).	BOD, COD, Amonia Bebas (NH ₃), Oksigen Terlarut (DO).	Mikroalga terimobilisasi (<i>C. vulgaris</i> & <i>S. dimorphus</i>) + Bakteri heterotrofik (<i>Bacillus</i> sp. & <i>Pseudomonas</i> sp.)	<i>Floating bio-filter mat</i> di sekeliling jaring; siklus mutualistik gas CO ₂ -O ₂ dan nitrifikasi dipercepat (Hering-Peter dkk., 2026; Vo dkk., 2024).	Potensi Reaktor Terkontrol: Reduksi BOD 82%, COD 75%, serta penyisihan amonia bebas 92% disertai pemulihan DO >8 mg/L; performa pada skala danau terbuka dipengaruhi dinamika iklim (Perales-Pérez dkk., 2023; Vo dkk., 2024).
Zona Pesisir Dampak Gulma (Area Akumulasi)	Dekomposisi anaerobik biomassa mati eceng gondok pasca-pembersihan (Prasetyo dkk., 2025).	Senyawa Selulosa/Lignin Sedimen, Gas Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	Konsorsium bakteri pembentuk biofilm dan bakteri lignolitik indigen.	Biostimulasi dekomposisi aerobik material tanaman; kompetisi ruang penempelan makrofit (Pereira & Mulligan, 2023).	Akselerasi Uji Lapangan Terbatas: Mempercepat pembusukan sehat secara aerobik, mencegah akumulasi gas beracun, dan menekan laju pendangkalan lokal (Mazurkiewicz dkk., 2020; Prasetyo dkk., 2025).
Zona Pusat Antropogenik (Dermaga & Fasilitas Wisata)	Limbah cair domestik non-komunal dan limpasan	COD, Total Coliform, Lipid/Minyak Organik).	Konsorsium multi alga toleran (<i>Anabaena</i> sp. & <i>Spirulina</i> sp.) + Bakteri	Biodegradasi senyawa karbon kompleks pariwisata; kometabolis	Potensi Eksperimental Terbatas: Menurunkan nilai parameter COD 78% di bawah kondisi uji laboratorium serta menekan cemaran

Kluster Spasial Danau	Sumber Polusi Dominan	Parameter Kualitas Air Target	Konfigurasi Agen Biologis Pilihan	Mekanisme Interaksi Utama	Potensi Reduksi Berdasarkan Bukti Empiris
	minyak fasilitas wisata (Widyasari dkk., 2024)		produsen biosurfaktan.	me polutan campuran dalam matriks limbah (Vo dkk., 2024).	bakteri enterik secara simultan (Widyasari dkk., 2024; Vo dkk., 2024).

3.4. Tantangan Implementasi Lapangan, Risiko Ekologis, dan Arah Riset Masa Depan

Penerapan teknologi bioremediasi konsorsium pada skala riil perairan terbuka Danau Batur dihadapkan pada sejumlah kendala operasional lingkungan (*uncertainty*) yang tidak dijumpai pada skala uji laboratorium:

- Risiko Pencucian Sel (*Cell Washout*): Dinamika hidrologi hidrolik dan fluktuasi pergerakan arus air di kaldera Batur dapat merusak integritas mekanis matriks penahan *bio-filter* mengapung. Kondisi ini memicu pelepasan dini sel mikroalga (*cell washout*) ke perairan bebas sebelum optimal menyerap nutrisi, yang merupakan tantangan utama sistem imobilisasi pada badan air terbuka (Hering-Peter dkk., 2026).
- Ledakan Populasi Sekunder (*Secondary Blooming*): Kebocoran atau pelepasan agen mikroalga introduksi dalam konsentrasi tinggi ke badan air danau yang kaya akan ketersediaan nitrogen dan fosfat berisiko memicu umpan balik ekologis berupa fenomena *blooming* sekunder yang mengganggu penetrasi cahaya dan menekan indeks fitoplankton alami (Suryani dkk., 2025).
- Kompetisi Relung dengan Komunitas Mikroba Asli: Agen mikroorganisme yang diintroduksi berpotensi gagal beradaptasi akibat tekanan paparan senyawa belerang periodik khas kaldera aktif vulkanik Danau Batur atau kalah bersaing dalam perebutan relung ekologis dengan mikroba indigen lokal yang telah beradaptasi dengan fluktuasi kualitas air setempat (Nuringtyas dkk., 2023; Sani dkk., 2024).
- Manajemen Biomassa Mati Pasca-Remediasi: Akumulasi biomassa tanaman makrofit dan *bio-filter mat* yang telah jenuh mengikat nutrisi harus dipanen secara periodik (Pereira & Mulligan, 2023). Kelalaian manajemen pemanenan menyebabkan tanaman mati membusuk secara anaerobik di dasar air, yang mentransfer kembali seluruh polutan organik ke sedimen dan memicu siklus eutrofikasi baru di Danau Batur (Widyasari dkk., 2024).

Guna mengatasi tantangan tersebut, arah penelitian masa depan (*future research direction*) wajib dialihkan dari pengujian statis laboratorium menuju uji coba lapangan langsung skala pilot (*in-situ pilot-scale project*) pada kluster operasional terbatas di Danau Batur. Pengembangan formula matriks amobilisasi hibrida berbasis polimer lokal yang tahan benturan gelombang menjadi kebutuhan riset yang krusial untuk menjamin stabilitas konsorsium. Selain itu, langkah skrining, isolasi, dan propagasi massal strain lokal (*indigenous strain*) yang diambil langsung dari wilayah perairan terdampak Danau Batur harus diprioritaskan demi menjamin ketahanan fungsional terhadap karakteristik kimia-sulfur ekstrem dan meminimalkan risiko ketidakpastian biosekuriti ekologis (Suryani dkk., 2025).

3.5. Implikasi Manajemen bagi Pengelola Danau

Secara praktis, draf kerangka kerja berbasis zonasi ini memberikan matriks keputusan taktis bagi instansi pengelolaan lingkungan hidup daerah dalam membagi alokasi sumber daya pemulihan danau secara proporsional demi mengendalikan pencemaran perairan. Pengelola perairan tidak lagi memandang Danau Batur sebagai satu ekosistem tunggal yang homogen, melainkan dapat melakukan intervensi biokontrol spesifik sesuai kluster spasial yang telah dipetakan pada Tabel 2.

Sistem *bio-filter* mengapung dapat langsung dipasang mengelilingi konstruksi KJA komersial untuk mengasimilasi buangan nitrogen dan karbon organik secara instan dari sumbernya sebelum menyebar ke

zona limnis yang lebih luas. Di sisi lain, alokasi anggaran fisik dapat difokuskan untuk membangun barier vegetasi *constructed wetlands* pada titik-titik muara saluran interseptor pertanian hortikultura di tepi danau guna menahan limpasan hara makro (Pereira & Mulligan, 2023; Sani dkk., 2024). Dengan pendekatan manajemen berbasis zonasi ini, kebijakan pemulihan ekosistem Danau Batur dapat berjalan lebih efisien, terukur, dan berbasis pada karakteristik riil beban pencemaran setempat.

4. Simpulan

Tinjauan ini berhasil menyintesis keunggulan performa dari berbagai agen bioremediasi lintas taksa untuk merumuskan sebuah model kerangka kerja berbasis zonasi spasial yang taktis di Danau Batur. Sinergisme sistem lingkaran-tertutup (*closed-loop system*) yang mengintegrasikan aktivitas degradasi bakteri heterotrof, kemampuan fiksasi karbon dan asimilasi nutrisi oleh mikroalga fotosintetik, serta kapasitas bio-retensi vegetasi makrofit litoral terbukti secara ilmiah mampu mengatasi kompleksitas polutan organik dan pengayaan hara makro secara simultan.

Melalui pendekatan spasial, usulan pembagian Danau Batur ke dalam empat klaster operasional terarah, yaitu Zona Litoral, Zona Limnis KJA, Zona Pesisir Dampak Gulma, dan Zona Pusat Antropogenik memberikan landasan taktis bagi otoritas pengelola perairan untuk melakukan intervensi biokontrol yang proporsional dan spesifik sumber pencemar. Secara implikasi praktis, integrasi teknologi ini menawarkan solusi mitigasi eutrofikasi yang efisien langsung pada titik pelepasan limbah, baik berupa pemasangan floating bio-filter mat di sekeliling KJA maupun pembangunan barier *constructed wetlands* di wilayah pesisir.

Kendati demikian, batasan utama dari studi ini terletak pada ketergantungan data sekunder yang mayoritas diperoleh dari skala eksperimental laboratorium atau mesokosmos terkontrol. Mengingat kompleksitas parameter lingkungan riil di kaldera vulkanik Danau Batur, pelaksanaan validasi lapangan langsung (*in-situ pilot-scale project*) mutlak menjadi prasyarat wajib guna menguji ketahanan fungsional konsorsium, standarisasi matriks imobilisasi sel, serta meminimalkan risiko ketidakpastian ekologis sebelum teknologi ini diimplementasikan secara makro.

Daftar Pustaka

- Agustina, A., & Aprinica, N. P. I. (2022). Dampak pariwisata terhadap pencemaran air danau batur kabupaten bangli. *Jurnal Ilmiah Hospitality Management*, 12(2), 81-89.
- Almalia, R., Soewondo, P., & Sunaryani, A. Penyisihan Nutrien dengan Material Zeolit dan Karbon Aktif dalam Teknologi Sediment Capping Studi Kasus Danau Batur Bali.
- Ameen, F. (2023). Improving tannery wastewater treatments using an additional microbial treatment with a bacterial–fungal consortium. *Biology*, 12(12), 1507.
- Bagus Nuringtyas, S., Harini, R., & Widayani, P. (2023, November). Study of water degradation due to community activities in The Lake Batur ecosystem, Bangli District, Bali. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 468, p. 03008). EDP Sciences.
- Bahri, S. (2016). Identifikasi sumber pencemar nitrogen (N) dan fosfor (P) pada pertumbuhan melimpah tumbuhan air di Danau Tempe, Sulawesi Selatan. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 159-174.
- Bai, R. G., Chandrasekharan Nair, S., Joller-Vahter, L., & Kikas, T. (2025). Microalgae in Mitigating Industrial Pollution: Bioremediation Strategies and Biomagnification Potential. *Biomass*, 5(4), 61.
- Dwipayana, I., Febryanti, N. L. P. K., Ginantra, I. K., Yuni, L. P. E. K., & Watiniasih, N. L. (2026). Advances in molecular sexing of monomorphic birds in Indonesia: A scoping-review with potential application on the Bali starling (*Leucopsar rothschildi*) breeding. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Biologia*, 71(1), 1.
- Efremenko, E., Stepanov, N., Senko, O., Aslanli, A., Maslova, O., & Lyagin, I. (2024). Using fungi in artificial microbial consortia to solve bioremediation problems. *Microorganisms*, 12(3), 470.

- Gong, W., Browne, J., Hall, N., Schruth, D., Paerl, H., & Marchetti, A. (2017). Molecular insights into a dinoflagellate bloom. *The ISME journal*, 11(2), 439-452.
- Griffith, A. W., & Gobler, C. J. (2020). Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae*, 91, 101590.
- Harlianti, U., Bijaksana, S., Iskandar, I., Lubis, R. F., Venkateshwarlu, M., Satyakumar, A. V., ... & Ibrahim, K. (2025). Magnetic properties of surface sediments in a closed alkaline volcanic lake: A case study from Lake Batur, Bali, Indonesia. *International Journal of Sediment Research*.
- Hering-Peter, C., Holm, N. C., & Schulz, R. (2026). Characterization of floc-forming, fast-sedimenting microalgae-bacteria consortia used for low-cost biomass harvesting in chemostatic bioreactors. *Algal Research*, 104660.
- Javed, F., Hassan, A. A., Al-Darmaki, N., & Al-Zuhair, S. (2026). Microalgae–Bacteria Consortia for Efficient FOG Removal from Real Municipal Wastewater. *Chemical Engineering Journal Advances*, 101182.
- Kaur, S. (2020). Bio-manipulation: A restoration tool for eutrophied lakes. *IJFBS*, 7, 1-4.
- Khasanah, D. N., & Handayani, A. T. (2025). Article Review: Potential of Plants in Bioremediation of Waters Polluted by Industrial and Domestic Waste. *Agritech: Jurnal Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Purwokerto*, 27(2), 61-73.
- Mazurkiewicz, J., Mazur, A., Mazur, R., Chmielowski, K., Czekala, W., & Janczak, D. (2020). The process of microbiological remediation of the polluted Słoneczko reservoir in Poland: for reduction of water pollution and nutrients management. *Water*, 12(11), 3002.
- Perales-Pérez, Á., Macías-Sánchez, M. D., Ruiz, J., Perales, J. A., & Garrido-Pérez, C. (2023). Process for nutrient recycling from intensive aquaculture through microalgae-bacteria consortium. *Science of the Total Environment*, 901, 165848.
- Pereira, A. C., & Mulligan, C. N. (2023). Practices for eutrophic shallow lake water remediation and restoration: A critical literature review. *Water*, 15(12), 2270.
- Prasetyo, S., Soeprbowati, T. R., Tirtaduna, T., Purnomo, A., Hartati, S., Chodrijah, U., ... & Prabowo, R. (2025). Assessment of Water Pollution Levels in Lake Batur, Indonesia and their Effect on Water Weed Presence. *The Philippine Agricultural Scientist*, 108(1), 6.
- PUTRI SURYANI, S. A., SUDIARTA, I., DARMADI, N., SEMARA EDI, D. G., SUDIARTA, I. K., SURYA PRATAMA, G. A., ... & SUGIANA, I. (2025). Ecological diagnosis of Lake Batur (Bali, Indonesia) post-disturbance using multimetric phytoplankton indices. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 26(10).
- Ramadhaniaty, N., & Widiyastuti, D. A. (2025, July). Keanekaragaman mikroalga dan fungsinya sebagai bioindikator dalam ekosistem perairan sungai. In *Seminar Nasional Pendidikan Biologi ULM* (Vol. 1, No. 2, pp. 266-277).
- Sani, I. F., Sunaryani, A., & Utami, R. (2024). Identifikasi Kualitas Air dan Pencemaran Nutrien di Danau Batur dari Parameter Total Fosfat dan Total Nitrogen. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(2), 325-331.
- Setiawan, F., Nuraini, A., Nugroho, C. D., Bimarta, A., Atpriana, R., & Ulayya, V. J. (2026). Dinamika Trofik dan Respons Komunitas Plankton terhadap Tekanan Eutrofikasi di Ekosistem Pesisir: Sebuah Tinjauan Literatur Sistematis. *Jurnal Miyang: Ronggolawe Fisheries and Marine Science Journal*, 6(1), 1-10.
- Sunaryani, A., Santoso, A. B., Soewondo, P., Suharyanto, Imananda, A., & Sani, I. F. (2024, November). Eutrophication in Lake Batur: Current status and management strategies. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 485, p. 03013). EDP Sciences.
- Utama, I. P. W., Arthana, I. W., Nuarsa, I. W., & Wiranatha, A. S. (2024). Model Sistem Dinamik untuk Keberlanjutan Danau Batur, Batur UNESCO Global, Geopark, Bali.

- Vo, T. P., Danaee, S., Chaiwong, C., Pham, B. T., Kim, M., Kuzhiumparambil, U., ... & Vo, P. H. (2024). Microalgae-bacteria consortia for organic pollutants remediation from wastewater: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114213.
- Widyasari, N. P. S., Wesnawa, I. G. A., & Atmaja, D. M. (2024). Lake Batur water quality analysis through Storet method as an effort to control lake water pollution. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Science*, 3(11).
- Zhao, W., Tian, K., Zhang, L., Tang, Y., Chen, R., Zheng, X., & Zhao, M. (2025). Harnessing an algae–bacteria symbiosis system: Innovative strategies for enhancing complex wastewater matrices treatment. *Sustainability*, 17(15), 7104.