

STRATEGI PENGELOLAAN KERAMBA JARING APUNG UNTUK DANAU BATUR YANG BERKELANJUTAN

HADIID AGITA RUSTINI



ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Strategi Pengelolaan Keramba Jaring Apung untuk Danau Batur yang Berkelanjutan” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Hadiid Agita Rustini
P0602202030



RINGKASAN

HADIID AGITA RUSTINI. Strategi Pengelolaan Keramba Jaring Apung untuk Danau Batur yang Berkelanjutan. Dibimbing oleh ASEP SAPEI, ETTY RIANI dan MACHFUD.

Danau Batur merupakan danau vulkanik tertutup terbesar di Bali yang dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan, termasuk budidaya ikan dengan keramba jaring apung (KJA). Karakteristik danau tertutup menyebabkan nutrisi dan bahan organik cenderung terakumulasi sehingga Danau Batur lebih rentan mengalami eutrofikasi. Meskipun budidaya KJA memberikan manfaat ekonomi, ekspansi KJA telah diikuti oleh penurunan kualitas perairan, kematian massal ikan yang berulang, serta konflik pemanfaatan ruang perairan. Pengelolaan akuakultur di Danau Batur karena itu memerlukan pendekatan yang mampu menyeimbangkan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. *Ecosystem Approach to Aquaculture* (EAA) dikembangkan untuk mengintegrasikan akuakultur dalam sistem sosial-ekologis melalui penyeimbangan empat dimensi daya dukung, yaitu fisik, produksi, ekologi, dan sosial. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih mengevaluasi setiap dimensi tersebut secara terpisah, sehingga keterkaitan antar dimensi daya dukung dalam mendukung pengambilan keputusan pengelolaan belum banyak dikaji secara empiris. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi daya dukung ekologi Danau Batur dan cakupan spasial dampak ekologis aktivitas KJA, menganalisis implikasi terlampauinya daya dukung ekologi terhadap daya dukung fisik, produksi, dan sosial, serta merumuskan strategi pengelolaan KJA dalam kerangka EAA.

Daya dukung ekologi dihitung berdasarkan kapasitas asimilasi fosfor sesuai Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009. Cakupan spasial dampak ekologis dianalisis menggunakan karakteristik geokimia sedimen melalui analisis multivariat untuk membedakan area terdampak dan area kontrol. Daya dukung fisik pada awal terjadinya kematian ikan massal 2011 dievaluasi dengan menggunakan *Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index* (CCME-WQI). Perubahan daya dukung fisik, produksi, dan sosial dianalisis menggunakan data deret waktu (2011-2023) kualitas lingkungan, luas KJA, produksi budidaya, dan hasil tangkapan nelayan tradisional. Selanjutnya, strategi pengelolaan dirumuskan menggunakan Bayesian *Best-Worst Method* untuk pembobotan kriteria dan PROMETHEE untuk penentuan prioritas alternatif.

Perhitungan daya dukung ekologi menunjukkan bahwa Danau Batur tidak memiliki daya dukung ekologi untuk budidaya KJA (0 KJA) karena sebagai danau tertutup tidak memiliki kapasitas asimilasi terhadap tambahan beban fosfor. Temuan ini diperkuat oleh analisis geokimia sedimen yang menunjukkan bahwa terdapat gradien geokimia utama yang memisahkan area yang kaya akan unsur-unsur terkait material organik (C, N, P) dan area yang kaya akan unsur-unsur litogenik. Area yang kaya akan unsur organik disebut area terdampak KJA, dan area yang dominan unsur litogenik menjadi area kontrol. Sedimen di area terdampak KJA mengandung C dan N berturut-turut $10,11 \pm 2,11\%$ and $0,83 \pm 0,17\%$, sementara area kontrol mengandung C dan N berturut-turut $3,86 \pm 2,38\%$ and $0,24 \pm 0,20\%$. Perbedaan signifikan antara area terdampak KJA dan area kontrol ($p < 0,001$) menunjukkan ukuran efek yang sangat besar (Cohen's $d = 2,81$ untuk C

dan 3,25 untuk N), yang mengindikasikan pengayaan bahan organik yang kuat di area terdampak KJA.

Nilai CCME-WQI menunjukkan bahwa daya dukung fisik Danau Batur telah berada pada kategori rendah pada tahun 2011. Terlampauinya daya dukung ekologi berkaitan dengan penurunan daya dukung fisik yang ditunjukkan oleh meningkatnya indikator eutrofikasi dan menurunnya transparansi perairan. Hal ini juga berkaitan dengan penurunan daya dukung produksi yang ditunjukkan oleh menurunnya produktivitas budidaya. Analisis deret waktu (2011-2023) menunjukkan bahwa penambahan luas area KJA tidak menghasilkan peningkatan produksi total yang sebanding ($R^2 = 0,28$; $p > 0,05$). Sebaliknya, produktivitas KJA per satuan luas menunjukkan tren penurunan yang sangat kuat dan signifikan ($R^2 = 0,94$; $p < 0,001$). Selain itu terjadi pula penurunan daya dukung sosial yang ditunjukkan oleh menurunnya hasil tangkapan nelayan, berkurangnya akses terhadap ruang perairan, dan munculnya konflik pemanfaatan ruang antara budidaya dan perikanan tangkap. Analisis spasial menunjukkan bahwa 65,25% jumlah KJA berada pada perairan dengan kedalaman kurang dari 20 m, yaitu kawasan yang secara ekologis berfungsi sebagai habitat penting ikan sekaligus merupakan daerah utama penangkapan ikan oleh nelayan tradisional. Kondisi tersebut menunjukkan adanya tumpang tindih pemanfaatan ruang antara kegiatan budidaya dan perikanan tangkap. Selain itu, hasil regresi menunjukkan bahwa produksi perikanan tangkap memiliki hubungan positif yang kuat dengan produktivitas KJA ($R^2 = 0,89$; $p < 0,001$). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa penurunan hasil tangkapan nelayan dan produktivitas budidaya kemungkinan dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang sama, yaitu penurunan kualitas ekosistem Danau Batur akibat terlampauinya daya dukung ekologi. Hasil ini diperkuat oleh studi terdahulu yang menunjukkan bahwa nelayan cenderung menghindari area KJA karena berisiko merusak alat tangkap, sehingga ekspansi KJA tidak hanya menurunkan kualitas habitat ikan, tetapi juga mengurangi akses nelayan terhadap daerah penangkapan. Analisis Bayesian BWM-PROMETHEE menunjukkan bahwa alternatif strategi dengan prioritas tertinggi adalah penghapusan KJA dan konversi budidaya ke sistem budidaya darat.

Kontribusi utama penelitian ini meliputi tiga aspek. Pertama, penelitian ini memperluas penerapan *Ecosystem Approach to Aquaculture* (EAA) pada sistem danau tertutup (*endorheic lake*) yang memiliki karakteristik limnologis berbeda dengan badan air terbuka. Kedua, penelitian ini menyediakan bukti empiris bahwa terlampauinya daya dukung ekologi berkaitan dengan penurunan daya dukung fisik, produksi, dan sosial, sehingga memperkuat pemahaman mengenai keterkaitan antar dimensi daya dukung dalam kerangka EAA. Ketiga, penelitian ini mengembangkan pendekatan delineasi area terdampak dan area referensi berdasarkan karakteristik geokimia sedimen melalui analisis multivariat, sehingga evaluasi dampak ekologis tidak bergantung pada asumsi jarak dari lokasi budidaya.

Kata kunci: Bayesian BWM-PROMETHEE, Danau Batur, daya dukung, geokimia sedimen, keramba jaring apung.



SUMMARY

HADIID AGITA RUSTINI. Management Strategy of Floating Net Cages for a Sustainable Lake Batur. Supervised by ASEP SAPEI, ETTY RIANI and MACHFUD.

Lake Batur is the largest volcanic endorheic lake in Bali and supports multiple uses, including floating net cage (FNC) aquaculture. As a closed lake, its limnological characteristics promote the accumulation of nutrients and organic matter, making it particularly vulnerable to eutrophication. Although FNC aquaculture provides substantial economic benefits, its expansion has been accompanied by declining water quality, recurrent mass fish mortality events, and conflicts over the use of aquatic space. Aquaculture management in Lake Batur therefore requires an approach that balances environmental, economic, and social objectives. The Ecosystem Approach to Aquaculture (EAA) was developed to integrate aquaculture into broader social-ecological systems by balancing four dimensions of carrying capacity: physical, production, ecological, and social. However, most previous studies have evaluated these dimensions separately, so the interlinkages among carrying capacity dimensions in supporting management decision-making have not been extensively examined empirically. This study aimed to evaluate the ecological carrying capacity of Lake Batur and the spatial extent of ecological impacts caused by FNC aquaculture, analyze the implications of ecological carrying capacity exceedance for physical, production, and social carrying capacities, and formulate sustainable FNC management strategies within the EAA framework.

Ecological carrying capacity was estimated using the phosphorus assimilation capacity approach based on the Indonesian Ministry of Environment Regulation No. 28 of 2009. The spatial extent of ecological impacts was assessed through multivariate analysis of sediment geochemical characteristics to distinguish impacted and control areas. Physical carrying capacity at the onset of the mass fish kill in 2011 was evaluated using the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI). Changes in physical, production, and social carrying capacities were analyzed using time-series data on water quality, FNC area, aquaculture production, and traditional capture fisheries production. Subsequently, management strategies were prioritized using the Bayesian Best-Worst Method (Bayesian BWM) for criteria weighting and PROMETHEE for ranking alternative strategies.

Ecological carrying capacity assessment indicated that Lake Batur has no remaining ecological carrying capacity for FNC aquaculture (0 FNC units) because, as an endorheic lake, it lacks the capacity to assimilate additional phosphorus loads. This finding is reinforced by sediment geochemical analysis, which reveals a major geochemical gradient separating areas rich in organic-related elements (C, N, P) from areas rich in lithogenic elements. The area rich in organic elements is designated as the FNC-impacted area, while the lithogenic-dominated area serves as the control area. Sediments in the FNC-impacted area contain C and N of $10.11 \pm 2.11\%$ and $0.83 \pm 0.17\%$, respectively, while the control area contains C and N of $3.86 \pm 2.38\%$ and $0.24 \pm 0.20\%$, respectively. The significant difference between the FNC-impacted and control areas ($p < 0.001$) indicates a very large effect size



(Cohen's $d = 2.81$ for C and 3.25 for N), indicating strong organic enrichment in the FNC-impacted area.

The CCME-WQI values indicate that the physical carrying capacity of Lake Batur was already in the low category in 2011. The exceedance of ecological carrying capacity was associated with declining physical carrying capacity, as reflected by increasing eutrophication indicators and decreasing water transparency. It is also associated with declining production carrying capacity, as indicated by declining aquaculture productivity. Time-series analysis (2011–2023) shows that increasing FNC area did not result in a proportional increase in total production ($R^2 = 0.28$; $p > 0.05$). In contrast, FNC productivity per unit area shows a very strong and significant declining trend ($R^2 = 0.94$; $p < 0.001$). In addition, a decline in social carrying capacity was observed, as indicated by reduced capture fishery production, diminished access to fishing grounds, and increasing spatial use conflicts between aquaculture and capture fisheries. Spatial analysis showed that 65.25% of FNCs were located in waters shallower than 20 m, which serve both as ecologically important fish habitats and the primary fishing grounds for traditional fishers. This spatial distribution indicates an overlap in the use of aquatic space between aquaculture and capture fisheries. Furthermore, regression analysis revealed a strong positive relationship between capture fishery production and FNC productivity ($R^2 = 0.89$; $p < 0.001$), indicating that both fishery sectors are affected by the same environmental conditions, i.e., water quality degradation due to the exceedance of ecological carrying capacity. In other words, the declining productivity of FNC and the declining catches of traditional fishers are consequences of the deteriorating ecosystem quality of Lake Batur. This interpretation is supported by previous studies showing that fishers tend to avoid areas occupied by floating net cages because of the risk of damaging their fishing gear. Consequently, the expansion of FNCs not only degraded fish habitat quality but also reduced fishers' access to fishing grounds. Bayesian BWM–PROMETHEE analysis shows that the highest-priority strategic alternative is the removal of FNC and conversion to land-based aquaculture systems.

The main contributions of this study include three aspects. First, this study extends the application of the Ecosystem Approach to Aquaculture (EAA) to a closed lake system (endorheic lake), which has limnological characteristics distinct from open water bodies. Second, this study provides empirical evidence that exceeding ecological carrying capacity is associated with declines in physical, production, and social carrying capacities, thereby strengthening the understanding of interlinkages among carrying capacity dimensions within the EAA framework. Third, this study develops an approach for delineating impacted and reference areas based on sediment geochemical characteristics through multivariate analysis, so that ecological impact assessment does not rely on distance-based assumptions from farming locations.

Keywords: Bayesian BWM–PROMETHEE, Lake Batur, carrying capacity, sediment geochemistry, floating net cages.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

STRATEGI PENGELOLAAN KERAMBA JARING APUNG UNTUK DANAU BATUR YANG BERKELANJUTAN

HADIID AGITA RUSTINI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

**ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Irzal Effendi, M.Si.
- 2 Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani, DEA.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Irzal Effendi, M.Si.
- 2 Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani, DEA.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Judul Disertasi: Strategi Pengelolaan Keramba Jaring Apung untuk Danau Batur
yang Berkelanjutan

Nama : Hadiid Agita Rustini
NIM : P0602202030

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Asep Sapei, MS.
NIP. 195610251980031003

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. Etty Riani, MS.
NIP. 196208121986032001

Pembimbing 3:

Prof. Dr. Ir. Machfud, MS.
NIP. 195103211978031003

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Lina Karlinasari, S.Hut., MSc.F.Trop.
NIP. 197311261998022001

Dekan Sekolah Pascasarjana:

Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc.
NIP. 196607281991031002

Tanggal Ujian:
22 Juli 2026

Tanggal Pengesahan Disertasi: 12 Agustus 2026

Tanggal Sidang Promosi Terbuka:
7 Agustus 2026



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala rahmat, karunia, dan ridha-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul “Strategi Pengelolaan Keramba Jaring Apung untuk Danau Batur yang Berkelanjutan” ini.

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Asep Sapei, MS., Prof. Dr. Ir. Etty Riani, MS., dan Prof. Dr. Ir. Machfud, MS., selaku Komisi Pembimbing, yang dengan sabar memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan hingga penyelesaian disertasi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Dr. Ir. Irzal Effendi, M.Si. dan Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani, DEA., selaku Penguji Luar Komisi Pembimbing, atas segala saran, kritik membangun, dan masukan ilmiah yang sangat berharga dalam upaya penyempurnaan disertasi ini.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. Lina Karlinasari, S.Hut., MSc.F.Trop. beserta seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Doktor Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, atas segala ilmu, dukungan akademik, pelayanan, dan fasilitas yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan doktor. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Limnologi dan Sumberdaya Air BRIN atas izin belajar serta dukungan berupa akses penggunaan laboratorium dan peralatan penelitian. Apresiasi yang tulus juga penulis sampaikan kepada seluruh anggota Kelompok Riset Dinamika Ekosistem Danau Tropis (T-LAKE), tim penelitian Danau Batur, dan segenap pihak yang telah membantu pelaksanaan pengambilan sampel di lapangan, analisis laboratorium, dan memberi masukan yang berharga dalam proses penulisan karya tulis ilmiah.

Penelitian ini dapat terlaksana berkat dukungan pendanaan dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan Republik Indonesia, melalui program beasiswa pendidikan doktor. Untuk itu, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih atas kesempatan yang telah diberikan sehingga studi ini dapat diselesaikan.

Ungkapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada suami, bapak, ibu, serta anak-anak atas pengertian, kesabaran, doa dan dukungan selama ini.

Semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang pengelolaan sumber daya perairan dan akuakultur berkelanjutan, serta menjadi masukan ilmiah dalam perumusan kebijakan pengelolaan keramba jaring apung di danau tertutup.

Bogor, Agustus 2026

Hadiid Agita Rustini

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	7
1.6 Kebaruan	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 <i>Ecosystem Approach to Aquaculture</i>	8
2.2 Daya Dukung Fisik	9
2.2.1 Indeks Kualitas Air	10
2.3 Daya Dukung Ekologi	11
2.3.1 Dampak Ekologi KJA	13
2.3.2 Analisis Komposisi Geokimia Sedimen	13
2.3.3 Kualitas Sedimen dan Penilaian Risiko Ekologis	14
2.4 Daya Dukung Produksi	15
2.5 Daya Dukung Sosial	15
III METODE	17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Jenis, Sumber, dan Teknik Pengumpulan Data	19
3.4 Prosedur Kerja dan Analisis Data	21
3.4.1 Evaluasi Daya Dukung Ekologi dan Cakupan Spasial Dampak Ekologis	21
3.4.2 Evaluasi Daya Dukung Fisik pada 2011	24
3.4.3 Analisis Perubahan Daya Dukung Fisik, Produksi, dan Sosial	25
3.4.4 Perumusan Strategi Pengelolaan KJA	26
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Evaluasi Daya Dukung Ekologi dan Cakupan Spasial Dampak Ekologis	30
4.1.1 Daya Dukung Ekologi Danau Batur	30
4.1.2 Distribusi Spasial Keramba Jaring Apung di Danau Batur	31
4.1.3 Gradien Geokimia Sedimen dan Delineasi Area Terdampak KJA	32
4.1.4 Validasi Delineasi Area Terdampak Berdasarkan Karakteristik Sedimen	36
4.1.5 Cu dan Zn sebagai Penanda Geokimia Aktivitas Budidaya KJA	37
4.1.6 Hubungan Cu dan Zn dengan Gradien Geokimia Sedimen	39
4.1.7 Evaluasi Risiko Ekologis Cu dan Zn pada Sedimen Danau Batur	40

4.1.8	Perbandingan dengan Sistem Akuatik Lainnya	42
4.1.9	Implikasi Ekologis pada Danau Tertutup	44
4.2	Evaluasi Daya Dukung Fisik pada 2011	45
4.3	Analisis Perubahan Daya Dukung Fisik, Produksi, dan Sosial	47
4.3.1	Perubahan Daya Dukung Fisik	48
4.3.2	Perubahan Daya Dukung Produksi	50
4.3.3	Perubahan Daya Dukung Sosial	52
4.3.4	Sintesis Perubahan Daya Dukung Berdasarkan Hasil Wawancara Pembudidaya KJA	54
4.4	Perumusan Strategi Pengelolaan KJA	57
4.4.1	Sintesis Hasil Penelitian	57
4.4.2	Tinjauan Pendekatan Restorasi Danau Eutrofik dan Relevansinya bagi Danau Batur	57
4.4.3	Alternatif Strategi Pengelolaan KJA	59
4.4.4	Kriteria Penilaian dan Pembobotan Kriteria	62
4.4.5	Hasil Analisis PROMETHEE	65
4.4.6	Analisis Sensitifitas	67
4.4.7	Prasyarat dan Tantangan Implementasi Strategi Pengelolaan KJA Berbasis EAA	69
4.5	Keterbatasan Penelitian	71
V	SIMPULAN DAN SARAN	72
5.1	Simpulan	72
5.2	Saran	73
	DAFTAR PUSTAKA	74
	LAMPIRAN	85
	RIWAYAT HIDUP	97

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Klasifikasi nilai CCME-WQI	11
2	Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian	18
3	Alat yang digunakan dalam survey lapangan	18
4	Alat dan bahan untuk uji laboratorium	18
5	Rangkuman hubungan tujuan, data, dan keluaran penelitian	19
6	Kualitas air optimal untuk pertumbuhan ikan tilapia	25
7	Perbandingan tingkat kepentingan dengan skala Saaty	27
8	Jumlah dan persentase keramba jaring apung berdasarkan desa di Danau Batur (Sumber: digitasi citra Google Earth)	32
9	Nilai $F1, F2, F3$, dan CCME-WQI dari seluruh lokasi sampling pada 2011	47
10	Nilai median dan maksimum rasio klorofil-a, TN, TP, dan transparansi terhadap baku mutu per tahun	50
11	Ringkasan statistik uji regresi antara variabel terkait daya dukung produksi di Danau Batur	52
12	Distribusi KJA berdasarkan kelas kedalaman dasar Danau Batur	53
13	Ringkasan statistik uji regresi antara variabel terkait daya dukung sosial di Danau Batur	54
14	Alternatif strategi pengelolaan KJA Danau Batur	62
15	Kriteria penilaian alternatif strategi	63
16	Nilai input dan hasil Bayesian <i>best-worst method</i> hasil wawancara pakar	64
17	Distribusi nilai Φ , Φ^+ , dan Φ^- hasil perhitungan PROMETHEE	65
18	Rangkuman analisis <i>stability interval</i> seluruh kriteria	68

DAFTAR GAMBAR

1	Peta lokasi penelitian	17
2	Peta lokasi pengambilan sampel sedimen dan tanah di Danau Batur	22
3	Distribusi spasial 10 unsur utama sedimen Danau Batur	33
4	Biplot PCA dari 10 unsur utama sedimen di 27 titik sampling	34
5	Distribusi spasial skor Dim1 PCA hasil interpolasi IDW. Skor tinggi (positif) menunjukkan area terdampak KJA, sedangkan skor rendah (negatif) merepresentasikan area kontrol yang didominasi unsur litogenik. Titik hitam menunjukkan lokasi KJA.	35
6	Boxplot konsentrasi C dan N di sedimen area terdampak (A) dan area kontrol (L) beserta hasil uji t masing-masing unsur.	37
7	Distribusi spasial Cu dan Zn hasil interpolasi IDW (kiri) dan biplot PCA 12 unsur dari 15 titik sampling (kanan)	39
8	Konsentrasi Cu dan Zn di area terdampak KJA (A) dan kontrol (L) relatif terhadap TEC dan PEC berbasis konsensus. Nilai p dari uji t ditunjukkan pada masing-masing plot unsur	41

9	Indeks geo-akumulasi Cu dan Zn di area terdampak KJA (A) dan kontrol (L). Nilai p dari uji t ditunjukkan pada masing-masing plot unsur.	41
10	Faktor risiko ekologi potensial Cu dan Zn di area terdampak KJA (A) dan kontrol (L). Nilai p dari uji t ditunjukkan pada masing-masing plot unsur.	42
11	Perbandingan konsentrasi C dan N sedimen di Danau Batur dengan Danau Daihai (Ren <i>et al.</i> 2024), Güllük Bay (Kucuksezgin <i>et al.</i> 2022), dan Waduk Keban (Varol 2019).	43
12	Dinamika kualitas air tahun 2011 dari enam titik sampling (titik biru) dibandingkan dengan baku mutu maksimal dan baku mutu minimal	46
13	Persentase ketidaksesuaian parameter kualitas air dengan kriteria optimal untuk ikan tilapia (kiri) dan nilai CCME-WQI per stasiun sampling (kanan).	46
14	Luas KJA dan jumlah RTP budidaya di Danau Batur pada 2011-2023 (Sumber: pengolahan data DPKPP).	48
15	Boxplot empat parameter kualitas air Danau Batur dibandingkan dengan baku mutu maksimal dan baku mutu minimal.	49
16	Hubungan antara produksi total dan luas KJA pada 2011-2023	51
17	Perubahan produktivitas KJA (kiri) dan hubungan antara produktivitas dan luas area KJA (kanan)	52
18	Hubungan antara produksi perikanan tangkap dan luas KJA (kiri) serta produktivitas KJA (kanan)	54
19	Analisis visual GAIA	66
20	Pemerinkkatan alternatif pada skenario equal weights	68

DAFTAR LAMPIRAN

1	Data kualitas air Danau Batur tahun 2011 (Sumber: Samuel et al. 2011)	86
2	Pedoman Wawancara Semi-terstruktur Petani KJA Di Danau Batur	87
3	Kuesioner Bayesian Best-Worst Method	88
4	Kuesioner PROMETHEE	91
5	Analisis sensitifitas PROMETHEE	94