



Valuasi Kerugian Pada Danau Terdampak Oleh Status Eutrofikasi: an Articles Review

Yayan Arie Kurniadi, Aji Ali Akbar, Herda Desmaiani

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Tanjungpura, Indonesia

yayanarie@gmail.com; aji.ali.akbar.2011@email.com; herda.desmaiani@google.com

*E-mail Corresponding Author : yayanarie@gmail.com

ABSTRAK

Abstrak: Penurunan kualitas danau akibat eutrofikasi yang dipicu oleh aktivitas pertanian, perkebunan, budidaya KJA, serta limbah domestik dan pariwisata mengancam keberlanjutan ekosistem perairan. Dampaknya berupa penurunan kualitas air, blooming alga, dan gangguan ekosistem yang merugikan sektor perikanan, pariwisata, dan pasokan air baku. Kerugian ekonomi diperkirakan mencapai miliaran hingga triliunan rupiah. Untuk mengatasinya, diperlukan pendekatan terpadu yang mencakup pengendalian sumber pencemar, rehabilitasi ekosistem, serta peningkatan partisipasi masyarakat dan pemantauan berkelanjutan.

Kata Kunci: Eutrofikasi, Danau, Valuasi Ekonomi, Manajemen Lingkungan.

Abstract: Lake degradation due to eutrophication, triggered by agricultural and plantation activities, KJA (Floating Net Cage) aquaculture, as well as domestic and tourism waste, threatens the sustainability of aquatic ecosystems. The impacts include declining water quality, algal blooms, and ecosystem disruption, which harm the fisheries, tourism, and raw water supply sectors. Estimated economic losses range from billions to trillions of Rupiah. To address this, an integrated approach is needed, encompassing pollution source control, ecosystem rehabilitation, and enhanced community participation and sustainable monitoring.

Keywords: Eutrophication, Lake, Economic Valuation, Environmental Management.

Article History:

Received: 17-10-2025

Revised : 25-10-2025

Accepted: 05-11-2025

Online : 10-11-2025



This is an open access article under the
CC-BY-SA license

LATAR BELAKANG

Danau merupakan badan air, sumber air alami dan ekosistem lahan basah yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan hidrologis, pengendali banjir dan kekeringan. Danau juga berperan sebagai penunjang kehidupan, masyarakat melalui kegiatan perikanan, pertanian, pariwisata, dan permukiman, serta berperan sebagai penyedia habitat bagi flora dan fauna (Mahmud dkk 2020; Sani dkk 2024; Permatasari dan Raldi 2022). Namun, kelestarian danau terancam oleh degradasi lingkungan seperti penyusutan luas dan pendangkalan (Mahmud dkk 2020), yang dapat disebabkan oleh alih fungsi lahan menjadi perkebunan dan pertanian yang menyebabkan peningkatan pada penggunaan pestisida dan pupuk anorganik (Sumarya dkk 2020; Permatasari dan Raldi 2022) sehingga menyumbang sediment, nutrient (N, P), dan pestisida yang masuk ke badan danau (Giri dan Zeyuan 2016). Beberapa pencemaran danau juga disebabkan oleh budidaya keramba jaring apung pada badan danau (Astuti dan Didik 2020).

Penggunaan pupuk anorganik pada lahan pertanian menyebabkan eutrofikasi pada danau yang disebabkan oleh aliran air permukaan ke danau (Piranti 2019). Pupuk anorganik yang banyak digunakan di pertanian dapat memperburuk kualitas air danau menjadi hipereutrofik dengan memicu pertumbuhan fitoplankton (Swarbrick dkk 2020). Status eutrofikasi ini pada ekosistem air memicu ledakan alga, mengurangi oksigen (zona mati), mengganggu rantai makanan, dan asidifikasi atau pelepasan (Al) dari tanah yang dapat beracun bagi ikan dan biota air (De Vries 2021). Masalah status eutrofikasi yang disebabkan oleh kegiatan pertanian maupun perkebunan pada badan danau ini banyak terjadi di beberapa negara seperti di Korea Selatan (Mamun dan Kwang 2017), United Kingdom (Crooks dkk 2021), Malaysia (Camara dkk 2019), dan Indonesia (Sani dkk 2024). Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi iklim di masing-masing negara. Musim panas secara langsung menentukan waktu dan jumlah pemasukan nutrient (terutama P) dan padatan tersuspensi ke dalam danau melalui aliran permukaan (Mamun dan Kwang 2017).

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, kajian ini mempertanyakan 1) faktor apa saja yang mempengaruhi terjadinya status eutrofikasi pada danau? 2) Nilai guna langsung apa saja yang mungkin terdampak oleh status eutrofikasi yang tinggi pada danau? 3) berapa valuasi kisaran kerugian yang mungkin terjadi akibat status eutrofikasi yang tinggi pada danau? 4) bagaimana rekomendasi pengelolaan untuk mengurangi status eutrofikasi pada danau?.

METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan metode studi literatur yang merupakan teknik pengumpulan data dengan melakukan studi penelaahan terhadap buku, literatur, catatan dan laporan yang memiliki hubungan dengan masalah yang telah dirumuskan dan akan dipecahkan (Nazir 1998). Literatur dikumpulkan dari sumber-sumber terpercaya seperti jurnal nasional dan internasional terindeks *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, dan *Google Scholar*. Kata kunci yang digunakan meliputi *eutrophication*, *lake degradation*, *nutrient pollution*, *economic valuation*, *ecosystem services*, *lake management*, dan kombinasi kata kunci tersebut dengan konteks Indonesia.

Sumber literatur dilakukan pemilahan dengan berdasarkan beberapa kriteria sebagai berikut.

- a. Publikasi pada 10 tahun terakhir (2015-2025) untuk memastikan relevansi data.
- b. Kajian ini terfokus pada danau alami yang terdampak aktivitas kegiatan manusia.
- c. Studi kasus dari berbagai negara dengan kondisi iklim berbeda untuk analisis komparatif.
- d. Memuat analisis kualitas air, dampak ekologi, ekonomi, atau kebijakan pengelolaan.

Temuan dari berbagai literatur kemudian disintesis guna menjawab masalah pada pertanyaan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Status Eutrofikasi Pada Danau

Eutrofikasi adalah proses penyuburan badan air yang berlebihan akibat masuknya nutrisi dalam jumlah besar yang mana pada umumnya adalah fosfor (P) dan nitrogen (N) yang dapat menyebabkan *algae* dan tumbuhan air mengalami pertumbuhan yang tidak terkendali (*blooming*) (Yusal dkk 2025; Camara dkk 2019). Proses ini dapat terjadi secara alami, namun kebanyakan kasus dipercepat oleh aktivitas manusia (*anthropogenic*), sehingga sering disebut dengan *cultural eutrophication* (De Vries 2021). Eutrofikasi sendiri telah menjadi masalah serius yang terjadi pada danau-danau di dunia, khususnya di Indonesia. Hal ini dapat dilihat dari status trofik pada Danau Rawapening (Piranti dkk 2018), Danau Batur (Sani dkk 2024), serta Danau Toba dan Limboto (Silaen 2022; Mahmud dkk 2020).

Penyebab utama eutrofikasi dapat berupa kegiatan antropogenik yang berperan memasukkan nutrisi ke badan danau melalui pertanian, terutama pada penggunaan pupuk kimia (urea, TSP, dan KCL) (Mamun dan Kwang 2017; Sani dkk 2024). Kegiatan pertanian yang berkualitas baik dengan penggunaan pupuk anorganik yang intensif menjadi sumber pencemar (Crooks dkk 2021), hal ini dapat dilihat dari kegiatan pertanian yang menyumbang fosfor (91,69%) di Danau Batur (Sani dkk 2024). Penyebab lain dari eutrofikasi pada badan air danau adalah berasal dari limbah cair domestik dan pariwisata yang mengandung nitrogen dan fosfor (Tanjung dkk 2024). Hal ini dapat dilihat dari meningkatnya beban organik dan nutrisi yang dilaporkan di kawasan wisata Danau Beratan dan Danau Toba (Agustina dan I ketut 2023; Silaen 2022). Demikian pula budidaya ikan dengan Keramba Jaring Apung (KJA) pada badan danau memberikan kontribusi signifikan terhadap nitrogen melalui sisa pakan dan kotoran ikan, seperti yang terjadi di Danau Maninjau (Soejarwo dkk 2022) dan Danau Laut Tawar dimana beban fosfor dari KJA telah melampaui daya tampung danau (Adhar dkk 2023).

Nutrien (terutama P dan N) masuk ke badan danau melalui aliran permukaan, erosi, atau limbah langsung yang membuat input nutrisi ke badan danau menjadi berlebihan (Piranti 2019; Kertia dkk 2018; Bernasová dkk 2024). Nutrien yang berlebih memicu pertumbuhan cepat *algae* dan fitoplankton, seperti *Anabaena* sp. dan *Oocystis* sp., yang menandakan kondisi eutrofik pada danau (Silaban dan Mastiur 2021; Li dkk 2024). Dekomposisi *algae* yang mati oleh bakteri dengan mengonsumsi oksigen menyebabkan kondisi hipoksia atau *dead zone* (Yusal dkk 2025). Pada kondisi tanpa oksigen, fosfor yang terikat dalam sedimen terlepas kembali ke air (*internal loading*) yang mengakibatkan

danau menjadi subur dan mempertahankan status eutrofikasinya (De Vries 2021).

Tingkat keparahan eutrofikasi juga dipengaruhi oleh faktor pendukung seperti kondisi alamiah danau dan iklim. Danau yang mengalami pendangkalan seperti Danau Limboto memiliki volume air yang lebih kecil yang menyebabkannya lebih rentan terhadap akumulasi polutan (Mahmud dkk 2020). Faktor iklim seperti musim hujan meningkatkan *runoff* yang membawa limpasan nutrisi dari darat masuk ke badan danau (Mamun dan Kwang 2017), sementara musim kemarau dengan suhu yang cukup tinggi dapat mempercepat metabolisme dan pertumbuhan *algae* (Swarbrick dkk 2020).

Status trofik perairan dapat diklasifikasikan berdasarkan konsentrasi klorofil-a, Total P, dan Total N (Hollister dkk 2016). Indeks seperti *Trophic State Index* (TSI) dan Indeks Biologi Diatom untuk Danau (IBDL) juga digunakan untuk menilai tingkat eutrofikasi (Tison-Rosebery dkk 2023; Tanjung dkk 2024).

2. Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Status Eutrofikasi Pada Danau

Konsep nilai guna langsung (*direct use value*) pada danau merujuk pada manfaat ekonomi yang langsung diperoleh dari pemanfaatan sumber daya danau oleh kegiatan manusia yang langsung dapat dinikmati dan dapat diukur dengan kegiatan nyata, umumnya sering memiliki nilai pasar. Manfaat-manfaat ekonomi ini mencakup sektor perikanan, pariwisata, rekreasi, penyediaan air baku dan irigasi. Tingginya status eutrofikasi pada danau dapat mempengaruhi dan berdampak buruk pada manfaat tersebut melalui penurunan kualitas air, *blooming algae*, hipoksia dan gangguan pada ekosistemnya (Du dkk 2023; Agam dkk 2022; Spence dkk 2023). Eutrofikasi ditandai dengan ledakan alga (*blooming algae*), penurunan oksigen terlarut, dan pendangkalan yang tidak hanya merusak ekosistem perairan tetapi juga secara langsung dapat menggerus nilai ekonomi danau (Syariah dkk 2021; Garcia Hernandez dkk 2022).

Eutrofikasi sangat berpengaruh besar pada produktivitas sektor perikanan. Hal ini dapat dilihat dari degradasi danau yang terjadi di Danau Limboto yang menyebabkan penurunan pendapatan nelayan tangkap, sedangkan pembudidaya ikan keramba jaring apung (KJA) justru mendapat keuntungan karena meningkatkan produktivitas ikan budidaya. Ketimpangan ekonomi dan konflik kepentingan pun dapat terjadi dalam pemanfaatan sumber daya danau (Syariah dkk 2021). Nilai rekreasi danau juga dapat terpengaruh karena kualitas air danau merupakan salah satu faktor penentu utama dalam rekreasi danau. Penelitian di Danau Tana (Ethiopia) menunjukkan bahwa peningkatan kualitas air danau dapat meningkatkan nilai rekreasi per kunjungannya, dengan total nilai tahunan yang terus melonjak (Wubalem dkk 2023). Sebaliknya, eutrofikasi yang menyebabkan ledakan alga dan bau tidak sedap dapat mengurangi daya tarik wisatawan dan nilai ekonomi kawasan (Spence dkk 2023). Eutrofikasi juga mempengaruhi dan mengancam fungsi danau sebagai penyedia air baku dan irigasi bagi masyarakat. Kualitas air danau yang buruk dapat meningkatkan biaya pengolahan (*treatment*) air minum dan dapat mengurangi kelayakan air untuk pertanian. Studi pada Danau Taihu menunjukkan bahwa meskipun kualitas air membaik, nilai jasa penyediaan air tetap dominan lebih dari 90% dari total nilai, namun tekanan eutrofikasi tetap masih mengancam keberlanjutan danau (Zhao dan Qiuyan 2021).

3. **Kisaran Valuasi Kerugian Akibat Status Eutrofikasi Yang Tinggi Pada Danau**

Eutrofikasi pada badan danau bukan hanya merupakan masalah ekologis, tetapi juga membawa dampak ekonomi yang cukup signifikan dan terukur. Kerugian ekonomi ini muncul bisa dalam bentuk penurunan nilai jasa ekosistem, biaya restorasi, hilangnya pendapatan dari sektor produktif (seperti perikanan dan pariwisata), serta kerugian non-market yang dirasakan masyarakat (Spence dkk 2023; Sampat dkk 2022). Kajian ini akan memaparkan kisaran kerugian ekonomi akibat eutrofikasi berdasarkan bukti-bukti empiris dari beberapa studi.

Tabel 1. Beberapa Studi Terkait Valuasi Kerugian Akibat Eutrofikasi Pada Danau

No	Lokasi & Sumber	Jenis Nilai/Kerugian	Metode Valuasi	Nilai (Per Tahun Kecuali Dinyatakan Lain)	Konteks & Keterangan
1	Danau Toba, Indonesia (Tambunan, 2017)	Nilai Guna Langsung (Perikanan)	Pendekatan Berbasis Pasar	Rp 45,36 Miliar	Kontribusi dari budidaya KJA (Rp 430,44 M) dan tangkap (Rp 138,36 M).
2	Danau Tana, Ethiopia (Getnet dan Tefera, 2021)	Kesediaan Membayar (WTP) untuk Atribut	<i>Choice Experiment</i>	848,19 - 1.381,23 ETB/rumah tangga	WTP tertinggi untuk peningkatan kualitas air.
3	Danau Tana, Ethiopia (Wubalem dkk 2023)	Nilai Rekreasi	<i>Travel Cost Method (TCM)</i>	USD 68,5 juta (status quo) -> USD 151 juta (ditingkatkan)	Potensi peningkatan nilai >2x lipat dengan perbaikan kualitas air.
4	Danau Malombe, Malawi (Makwinja dkk 2022)	WTP untuk Restorasi & Kerugian Nilai Jasa	<i>Contingent Valuation (CVM)</i>	WTP: USD 28,42/rumah tangga. Kerugian: USD 79,83 juta (20 tahun)	Degradasi mengancam pencapaian SDGs.
5	Danau Perkotaan, Coimbatore, India (Saravanakumar dkk 2023)	Total Nilai Ekonomi (TEV)	TCM + CVM	UBL: Rs 107,96 Lakh; SL: Rs 77,15 Lakh	80% nilai berasal dari nilai guna (rekreasi dominan).
6	South Carolina, USA (Ureta dkk 2024)	WTP untuk Peningkatan Kualitas Air	<i>Choice Experiment</i>	Manfaat Agregat: \$131 - \$165 juta	Masyarakat paling menghargai akses rekreasi dan hasil tangkapan ikan.
7	Danau Limboto, Indonesia (Syariah dkk 2021)	Kerugian Pendapatan & Total Nilai Ekonomi	Analisis Time Series + Valuasi Total	Kerugian: Rp 146,36 juta (nelayan bubu). TEV: Rp 581,92 Miliar	Degradasi merugikan nelayan tangkap, namun pembudidaya diuntungkan.
8	Great Lakes (Danau Erie), Kanada/AS (Garcia-Hernandez dkk 2022)	Biaya Kebijakan Pengurangan Polusi	Model Hidro-Ekonomi	CAD 1,24 - 1,7 Miliar (target 40% reduksi P)	Biaya untuk memulihkan danau skala besar sangat fantastis.

9	Danau Mendota, USA (Sampat dkk 2022)	Kerugian per Unit Polutan	Model Integrasi Ekologi-Ekonomi	USD 74,5 per kg Fosfor (P)	Dasar untuk kebijakan yang menargetkan sumber polusi.
10	Danau Tadlac, Filipina (Villaruel, 2024)	WTP untuk Restorasi Kualitas Air	<i>Contingent Valuation (CVM)</i>	Php 1.150,56 /rumah tangga	72,3% responden bersedia membayar untuk restorasi.
11	Danau Elk/Beaver, Kanada (Spence dkk 2023)	WTP untuk Restorasi & Biaya Restorasi	<i>Choice Experiment</i>	WTP: \$141-\$292 CAD/rumah tangga. Biaya: \$5,9 juta + \$253rb/tahun	Manfaat restorasi jauh lebih besar daripada biayanya.
12	Danau Taihu, China (Zhao dan Wang, 2021)	Nilai Jasa Ekosistem	Evaluasi Kualitas & Valuasi	RMB 119,96 Miliar (2018)	Nilai penyediaan air (>90%) mendominasi.
13	Taman Nasional Danau Sentarum, Indonesia (Roslinda, 2019)	Total Nilai Ekonomi (TEV)	Valuasi Komprehensif	Rp 139,1 Miliar	Biaya pengelolaan hanya 4,87% dari total nilai manfaat.
14	Global (Reynaud dan Lanzasova, 2017)	Nilai Rata-Rata Jasa Ekosistem Danau (Meta- Analisis)	Meta- Analisis	\$106-\$140/responen (Non-Hedonic); \$169 \$403/properti (Hedonic)	Terdapat trade-off antara jasa budaya dan regulasi.
15	Danau Ebinur, China (Tang dkk 2024)	Nilai Jasa Ekosistem (ESV)	Model GMOP-PLUS	67,28 Miliar Yuan (2020)	Skenario perlindungan ekologi (ELP) menghasilkan ESV tertinggi.
16	Zona Ekonomi-Ekologis Danau Dongting, China (Li dkk 2022)	Nilai Jasa Ekosistem (ESV)	Model XGBoost & SHAP	Kontribusi Lahan Perairan: $\pm 32\%$	Fungsi terpenting: regulasi air dan pengolahan limbah.
17	Danau Perkotaan, Wuhan, China (Du dkk 2023)	Total Nilai Ekosistem (Direct, Indirect, Non-Use)	Valuasi Komprehensif + WTP	Nilai Tidak Langsung (IUV) terbesar (43,47%), diikuti Non-Guna (32,92%)	Masyarakat memiliki WTP tinggi untuk pelestarian.
18	Danau Sebedang, Indonesia (Agam dkk 2022)	Total Nilai Ekonomi	Market Analysis + ITCM	Rp 3,19 Miliar	Nilai rekreasi mendominasi (68,89%).
19	Danau Poso, Indonesia (Sibarani dkk 2022)	Nilai Guna Langsung (Market-Based)	Pendekatan Berbasis Pasar	Rp 19,77 Miliar	Nilai irigasi untuk sawah dominan (86,2%). Nilai sebenarnya lebih besar.

20	Danau Perintis, Indonesia (Tabito dkk 2018)	Nilai Ekonomi Wisata	CVM (WTP)	Rp 4,06 Miliar	WTP pengunjung: Rp 106.100 per orang.
21	Danau Limboto, Indonesia (Noho dkk 2020)	Nilai Ekowisata	<i>Travel Cost Method (TCM) + WTP</i>	Rp 43,7 Miliar	WTP median: Rp 45.000 per kunjungan.
22	Tandon Ciater, Indonesia (Choirunisa dan Bahroin, 2023)	Nilai Wisata	<i>Travel Cost Method (TCM)</i>	Rp 2,92 Miliar	Surplus konsumen Rp 141.643 per kunjungan.
23	Danau Sentani, Indonesia (Mangiri dkk 2020)	Dampak Ekonomi Wisata	<i>ITCM & Multiplier Effect</i>	Rp 875,17 Juta	Dampak ekonomi rendah (multiplier 0,93) <i>due to economic leakage</i> .
24	Danau Maninjau, Indonesia (Antomi, 2020)	Nilai Ekonomi Budidaya KJA	Analisis Nilai Produksi	Rp 2,2 Triliun (pada 2014)	KJA menyumbang pendapatan tetapi menyebabkan pencemaran berat.
25	Danau Malili, Indonesia (Rahmawati dkk 2023)	Konflik Sosial-Ekonomi	Analisis Faktor & Valuasi	Rp 428.080,99 /responden (sangat rendah)	Konflik vertikal (masyarakat vs. perusahaan) berakar lama.

Menghitung kerugian total secara absolut dari semua danau di dunia adalah hal yang cukup sulit karena kompleksitas dan keterbatasan data. Namun, dengan menganalisis kisaran nilai dari berbagai studi yang telah disajikan, kita dapat memperkirakan besaran kerugian dalam beberapa kategori dan skala. Kerugian dalam skala danau individual (lokal/regional) dapat mencapai miliaran hingga puluhan miliar rupiah per tahun untuk sebuah danau. Sedangkan Kerugian dalam skala kawasan (nasional/internasional) untuk danau-danau besar yang menjadi pusat ekonomi regional, kerugiannya dapat mencapai orde triliunan rupiah atau ratusan juta hingga miliaran dolar Amerika Serikat. Bukti dari Danau Limboto, Indonesia, menunjukkan dampak kerugian finansial langsung dari degradasi danau, termasuk eutrofikasi. Degradasi ini menyebabkan penurunan pendapatan nelayan tangkap secara nyata. Kuantifikasi kerugian pada pendapatan agregat untuk nelayan yang menggunakan alat tangkap bubu sebesar 146,36 juta rupiah per tahun (Syariah dkk 2021). Sementara itu, di Danau Malombe, Malawi, degradasi ekologis yang parah, termasuk eutrofikasi, telah menyebabkan hilangnya nilai jasa ekosistem yang diperkirakan mencapai USD 79,83 juta dalam kurun 20 tahun, yang sangat mengancam mata pencaharian lokal yang bergantung pada sektor perikanan (Makwinja dkk 2022). Di sisi pariwisata, studi pada Danau Tana, Ethiopia, menunjukkan bahwa danau dengan kualitas air yang buruk memiliki nilai rekreasi (USD 151/kunjungan) yang jauh lebih rendah dibandingkan jika kualitas air ditingkatkan (USD 333/kunjungan). Hal ini mengindikasikan potensi kehilangan pendapatan wisata (*loss of economic value*) yang besar akibat eutrofikasi (Wubalem dkk 2023).

Tingginya biaya yang harus dikeluarkan untuk memulihkan danau yang eutrofik dapat dipandang sebagai cerminan dari besarnya kerugian yang telah terjadi. Studi di Danau Elk/Beaver, Kanada, memperkirakan biaya implementasi

rencana restorasi (oksigenasi dan manajemen *watershed*) mencapai \$5,9 juta CAD untuk biaya awal plus \$253.000 CAD untuk pemeliharaan tahunan (Spence dkk 2023). Analisis yang lebih kompleks pada Kawasan Danau Besar (*Great Lakes*) menunjukkan bahwa biaya ekonomi total untuk kebijakan pengurangan emisi nutrisi (fosfor) meningkat secara eksponensial ketika target semakin ambisius. Biaya untuk mencapai target pengurangan 40% polusi fosfor di Danau Erie saja diperkirakan antara CAD 1,24 - 1,7 miliar, suatu angka yang dinilai sangat besar (Garcia-Hernandez dkk 2022).

Beberapa studi berhasil menghitung kerugian ekonomi per unit polutan, memberikan pemahaman yang sangat berguna untuk analisis kebijakan. Di Danau Mendota, Amerika Serikat, dilakukan perhitungan bahwa setiap kilogram kelebihan fosfor (P) yang masuk ke danau menyebabkan kerugian ekonomi sebesar USD 74,5. Kerugian ini terutama berasal dari penurunan nilai properti (USD 25,9/kg P) dan sektor rekreasi (USD 45,4/kg P). Nilai "kerugian yang dihindari" (*Value of Statistical Outcome/VOS*) ini bahkan dapat menjadi insentif finansial untuk menciptakan pasar pengelolaan limbah yang terkoordinasi, di mana pada tingkat VOS \$45/kg P, semua kelebihan fosfor sudah dapat dikelola dengan teknologi yang sudah ada (Sampat dkk 2022).

Kerugian ekonomi juga tercermin dari kesediaan masyarakat (*Willingness to Pay/WTP*) untuk membiayai restorasi, yang merepresentasikan nilai yang mereka tempatkan pada danau yang sehat. Masyarakat sekitar Danau Malombe menyatakan WTP rata-rata USD 28,42 per rumah tangga per tahun untuk program restorasi (Makwinja dkk 2022). Demikian pula, studi di Danau Tadlac, Filipina, menemukan WTP rata-rata PHP 1.150,56 per tahun per rumah tangga (Villaruel, 2024). WTP ini adalah bentuk valuasi terhadap kerugian kesejahteraan (*welfare loss*) yang mereka alami akibat penurunan kualitas danau.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa kisaran kerugian ekonomi akibat eutrofikasi sangat bervariasi, mulai dari miliaran rupiah dalam skala regional (seperti di Danau Limboto dan *Great Lakes*) hingga puluhan dolar AS per kilogram polutan fosfor. Kerugian ini mencakup biaya langsung (hilangnya pendapatan), biaya restorasi, dan kerugian non-market yang direfleksikan melalui WTP (*willingness to pay*). Valuasi ekonomi ini memberikan argumen yang kuat bagi para pembuat kebijakan untuk melakukan investasi dalam pencegahan eutrofikasi, karena biaya pencegahan hampir selalu lebih rendah daripada biaya restorasi.

4. Rekomendasi Pengelolaan Untuk Mengurangi Status Eutrofikasi Pada Danau

Pengelolaan eutrofikasi harus dimulai dengan pengendalian sumber pencemar eksternal, terutama dari aktivitas pertanian. Pupuk kimia (khususnya urea, TSP, dan KCl) yang digunakan secara berlebihan dapat meningkatkan kadar nitrogen (N) dan fosfor (P) dalam tanah, yang selanjutnya terbawa aliran permukaan (*runoff*) ke badan air (Mawaddah dkk 2016; Krasilnikov dkk 2022). Kasus di Danau Rawapening menunjukkan bahwa limbah pertanian menyumbang 91,69% dari total fosfor yang masuk ke danau (Piranti 2019). Oleh karena itu, rekomendasi utama meliputi pengurangan penggunaan pupuk anorganik, penerapan pupuk organik, serta penggunaan teknik konservasi tanah seperti terasering dan penanaman vegetasi penutup untuk mengurangi erosi dan limpasan nutrisi (Nada dkk 2018; Andriyani dan Fiona, 2021).

Aktivitas budidaya ikan dengan sistem Keramba Jaring Apung (KJA) merupakan sumber pencemar nutrisi yang signifikan, terutama nitrogen. Kasus Danau Batur dan Danau Maninjau menunjukkan bahwa kontribusi KJA terhadap pencemaran nitrogen mencapai 45,19% (Sani dkk 2024) dan menyebabkan eutrofikasi yang parah (Soejarwo dkk 2022). Rekomendasi yang dapat diterapkan antara lain moratorium penambahan KJA baru, pendataan dan pengawasan ketat terhadap KJA yang sudah beroperasi, serta penerapan teknologi budidaya yang ramah lingkungan seperti sistem resirkulasi atau integrasi dengan tanaman air untuk menyerap kelebihan nutrisi (Soejarwo dkk 2022; Hendratta dkk 2024).

Limbah domestik dan aktivitas pariwisata turut berkontribusi terhadap peningkatan beban organik dan nutrisi di danau. Rekomendasi yang diperlukan meliputi penerapan sistem sanitasi yang berkelanjutan, serta edukasi masyarakat dan pelaku wisata tentang pengelolaan limbah yang bertanggung jawab (Kusuma dan Antonius, 2023; Kintani dkk 2024).

Rehabilitasi ekosistem danau melalui teknologi berbasis alam (*nature-based solutions*) terbukti efektif dalam mengurangi eutrofikasi. Contohnya adalah pemanfaatan lahan basah buatan (*constructed wetland*) dan tanaman air seperti eceng gondok, kangkung, dan rumput teki yang mampu menyerap nutrisi berlebih (Hendratta dkk 2024). Selain itu, pemanenan eceng gondok secara berkala dapat mengurangi penutupan permukaan danau dan mencegah pendangkalan (Piranti 2019).

Keberhasilan pengelolaan danau bergantung pada keterlibatan semua pemangku kepentingan. Kasus pada Danau Maninjau menunjukkan bahwa partisipasi masyarakat masih rendah dan perlu ditingkatkan melalui pendekatan *bottom-up* (Nanda dkk 2018). Rekomendasi kebijakan yang holistik mencakup penyusunan rencana aksi berbasis zonasi risiko (Mardiatno dkk 2021), serta penguatan koordinasi antarinstansi dan pemerintah daerah (Kintani dkk 2024). Keterlibatan pemangku kepentingan (44%) dinilai sebagai faktor terpenting, diikuti oleh sumber daya (*funding*), pengetahuan, dan tata kelola (*governance*) (Poikane dkk 2024).

Pemantauan kualitas air secara rutin dan penggunaan indikator biologis seperti diatom (IBDL) dapat menjadi alat yang efektif untuk menilai status ekologis danau dan responsnya terhadap upaya pengelolaan (Tison-Rosebery dkk 2023). Model prediktif berbasis GIS dan pemantauan parameter kunci seperti klorofil-a, TP, dan TN juga dapat membantu dalam perencanaan tindakan yang tepat dan efisien (Hollister dkk 2016; Li dkk 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Faktor utama penyebab eutrofikasi danau adalah aktivitas antropogenik, khususnya dari sektor pertanian (penggunaan pupuk anorganik berlebihan), budidaya ikan sistem Keramba Jaring Apung (KJA), serta limbah domestik dan pariwisata. Faktor alamiah seperti pendangkalan danau serta kondisi iklim (musim hujan dan suhu tinggi) turut memperparah akumulasi nutrisi dan pertumbuhan alga.
2. Nilai guna langsung danau yang terdampak eutrofikasi meliputi sektor perikanan (penurunan hasil tangkapan, meski budidaya KJA mungkin diuntungkan sementara), pariwisata dan rekreasi (penurunan kunjungan akibat penurunan

- kualitas air), serta fungsi penyediaan air baku dan irigasi (peningkatan biaya pengolahan air).
3. Valuasi kerugian ekonomi akibat eutrofikasi menunjukkan kisaran yang signifikan, mulai dari skala lokal hingga skala regional yang mencapai miliaran bahkan triliunan rupiah. Kerugian juga tercermin dari tingginya biaya restorasi dan kesediaan masyarakat membayar (WTP) untuk pemulihan danau.
 4. Rekomendasi pengelolaan yang efektif bersifat multi sektor, mencakup pengendalian sumber pencemar di watershed (seperti pertanian berkelanjutan dan pengelolaan KJA yang ketat), rehabilitasi ekosistem dengan solusi berbasis alam (seperti *constructed wetland*), serta penguatan tata kelola melalui koordinasi antar pemangku kepentingan dan pemantauan berkelanjutan)..

DAFTAR RUJUKAN

- Adhar, Saiful., Erlangga, Rachmawati R., Mainisa, Amni D., dan Urmila Z. 2023. Analisis Daya Tampung Beban Pencemaran Fosfor dan Dampak Keramba Jaring Apung di Danau Laut Tawar, Aceh Tengah. *Jurnal Riset Akuakultur*, 18 (2).
- Agam, Beryaldi., Dewi Merdekawati., Maryono., Nurul Fatimah Y., dan Reksi. 2022. Estimasi Nilai Ekonomi Danau Sebedang Kecamatan Sebawi Kabupaten Sambas. *Jurnal Mina Sains*, 8 (1) : 2407-9030.
- Agustina, A., dan I Ketut M. 2023. Dampak Pariwisata Terhadap Kualitas Air Danau Beratan Berdasarkan Parameter BOD dan COD. *Jurnal MANNER*, 2 (1).
- Andriyani, I dan Fiona C.P. 2021. Pengaruh Aplikasi Pupuk Organik Terhadap Produktivitas Terung (*Solanum Melongena*) Dan Tingkat Bahaya Erosi. *Jurnal Teknik pertanian lampung*, 10 (4) : 515-529.
- Antomi, Yudi. 2020. Analisis Perubahan Penggunaan Lahan dan Tingkat Kerentanan Sosial Ekonomi di Kawasan Danau Maninjau. *Jurnal Buana*, 4 (2).
- Astuti, L. P., dan Didik Wahyu H. T. 2020. Potensi Beban Pencemaran Fosfor di Waduk IR. H. Djuanda, Purwakarta, Jawa Barat. *BAWAL*, 12 (1) : 41-50.
- Camara, Moriken., Nor Rohaizah J., dan Ahmad F. B. A. 2019. Impact of Land Uses on Water Quality in Malaysia: a Review. *Ecological Processes*.
- Choirunisa, Irda., dan Bahroin I. T. 2023. Estimasi Nilai Ekonomi dan Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kunjungan Wisata Tandon Ciater Kota Tangerang Selatan Provinsi Banten. *Indonesian Journal of Agricultural, Resources and Environmental Economics*, 1 (2).
- Crooks, E. C., Ian M. H., and Sopan D. P. 2021. Influence of Land Use Land Cover on River Water Quality in Rural North Wales, UK. *Journal of The American Water Resources Association*, 57 (3).
- De Vries, W. 2021. Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21.
- Du, Juan., Rajendra Prasad S., Vilas N., Thi Phuoc L. N., dan Amar Razzaq. 2023. Unveiling the Value of Nature: A Comprehensive Analysis of the Ecosystem Services and Ecological Compensation in Wuhan City's Urban Lake Wetlands. *Water*, 15 (12).
- Garcia-Hernandez, J. A., Roy B., dan Rute P. 2022. Estimating the Total Economic Costs of Nutrient Emission Reduction Policies to Halt Eutrophication in The Great Lakes. *Water Resources Research*, 58.
- Getnet, Asmamaw., dan Tefera B. T. 2021. Economic Valuation of Attributes of Lake Tana: Random Parameter Model. *Heliyon*, 7.

- Giri, Subhasis dan Zeyuan Qiu. 2016. Understanding the Relationship of Land Uses and Water Quality in Twenty First Century: a Review. *Journal of Environmental Management of Science Direct*, 173.
- Hendratta L.A., Sugeng, H., Audy H.P.R., dan La'la M. 2024. Pemanfaatan Lahan Basah Buatan Untuk Mengurangi Degradasi Kualitas Air di Danau Tondano. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 4 (2) : 115-128.
- Hollister, J. W., W. B. Milstead, and B. J. Kreakie. 2016. Modeling lake trophic state: a random forest approach. *Ecosphere* 7(3):e01321.
- Kertia, Ida B.K.G., I Wayan A., dan I Wayan S.A. 2018. Studi Eutrofikasi Akibat Aktivitas Penggunaan Lahan di Danau Buyan. *ECOTRHOPIC*, 12 (2).
- Kintani, Inki M., Nurul K., dan Ubaidillah K. 2024. Analisis Rusaknya Ekologis Danau Rawa Pening Terhadap Ekosistem Disekitarnya Berdasarkan Peraturan Presiden No 60 Tahun 2021. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10 (24.2): 557-567.
- Krasilnikov, P., Miguel A.T., dan Amanullah. 2022. Fertilizer Use, Soil Health And Agriculture Sustainability. *Agriculture*, 12.
- Kusuma, I.B.K dan Antonius K.M.W. 2023. Evaluasi Sumber Sampah Terhadap Pencemaran Air di Kawasan Danau Buyan. *Jurnal Ilmiah Ikatan Penelitian Lingkungan Binaan Indonesia*.
- Li, Ronghui., Kaibang X., Guoli Zhao., Xianyu H., Zheng Li., Heng Wu., Xusheng H., Yue P., dan Li Liang. 2024. Comprehensive Assessment of Eutrophication and the Mechanisms Driving Phytoplankton Blooms in Multifunctional Reservoirs. *Water*, 16.
- Mahmud, S.L., Novianita A., dan Hasan S.P. 2020. Revitalisasi Danau Limboto dengan Pengerukan Endapan di Danau : Permodelan, Analisis, dan Simulasinya. *Jambura Journal of Biomathematics*, 1 (1) : 31-40.
- Makwinja, Rodgers., Seyoum M., Emmanuel K., dan Tena A. 2022. Willingness to Pay for the Ecological Restoration of Inland Freshwater Shallow Lake: Case of Lake Malombe, Malawi. *Heliyon*, 8.
- Mamun, Md dan Kwang-Guk An. 2017. Major Nutrients and Chlorophyll Dynamics In Korean Agricultural reservoirs along with an analysis of trophic state index deviation. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 10.
- Mangiri, Ditha., Hermanto S., dan Ernani R. 2020. Dampak Ekonomi dan Strategi Pengembangan Wisata Danau Sentani di Kabupaten Jayapura. *Journal of Regional and Rural Development Planning (Jurnal Pembangunan Wilayah dan Perdesaan)*, 4 (1).
- Manik, Gres Br., Disti F., Bryan S. S., Dedy S., Mutiara N. U. P. 2024. Perkembangan Ekonomi Pariwisata di Kawasan Danau Toba Tahun 2022. *ProBusiness: Management Journal*, 15 (6): 7-12.
- Mardiatno, Djati., Faridah., Sunarno., Dwi Wahyu A.N., Yuli W., dan M. Anggri S. 2021. Tata Kelola Lanskap Rawapening Berdasarkan Tingkat Risiko Bencana Lingkungan di Sub DAS Rawapening. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 5 (1): 21-40.
- Nada, I. M., I Wayan R., I G B Sila Dharma., A A Gde Agung Yana. 2018. Model Penataan Lahan Penanggulangan Erosi Berbasis Masyarakat di Kawasan Danau Batur. *Jurnal Bumi Lestari*, 8 (1) : 1-12.
- Nanda, L.D.N., Firwan T., dan Melinda N. 2018. Tingkat Partisipasi Masyarakat Dalam Program Penyelamatan dan Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan Danau Maninjau. *Jurnal Kebijakan Sosek KP*, 8 (2) : 63-75.
- Nazir, Mohammad. 1998. *Metode Penelitian*, Jakarta: Ghalia Indonesia.

- Noho, Yumanraya., Rendy W., dan Khrisna A. 2020. Analisis Nilai Ekonomi Pengembangan Ekowisata Kawasan Danau Limboto Menggunakan Travel Cost Method Approach. *AKSARA: Jurnal Ilmu Pendidikan Nonformal*.
- Permatasari, P. A., dan Raldi H.T.S.K. 2022. Pengelolaan Sempadan Danau di Kawasan Pertanian : Ulasan Bandingan Polandia, Tiongkok dan Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, 6 (3).
- Piranti, A.S. 2019. Pengendalian Eutrofikasi Danau Rawapening. Purwokerto : Universitas Jendral Soedirman.
- Poikane, Sandra., Martyn G. K., Gary, F., Laurence C., David P. H., Konstantina K., Miquel L., Stuart W., Bryan M. S., dan Kenneth I. 2024. A Global Assessment of Lake Restoration in Practice: New Insights and Future Perspectives. *Ecological Indicators*, 158.
- Rahmawati., Jamaluddin J., dan Andi A.A. 2023. Analisis Faktor Sosial-Ekonomi dari Pemanfaatan Kompleks Danau Malili Sulawesi Selatan. *JiIP (Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan)*, 6 (7).
- Reynaud, Arnaud., dan Denis Lanzasova. 2017. A Global Meta-Analysis of the Value of Ecosystem Services Provided by Lakes. *Ecological Economics*, 184-194.
- Roslinda, Emi. 2019. Economic Valuation of the Danau Sentarum National Park, West Kalimantan, Indonesia. *BIODIVERSITAS*, 20 (7).
- Sampat, Apoorva M., Andrea H., Gerardo J. R., dan Victor M. Z. 2022. Valuing Economic Impact Reductions of Nutrien Pollution From Livestock Waste. *National Library of Medicine: National Center for Biotechnology Information*.
- Sani, I. F., Astried S, dan Resarizki U. 2024. Identifikasi Kualitas Air dan Pencemaran Nutrien di Danau Batur dari Parameter Total Fosfat dan Total Nitrogen. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25 (2).
- Saravanakumar, V., S. Aswath., S. Senthilkumar., Umanath M., dan R. Paramasivam. 2023. Not Too Small to Benefit Society: Economic Valuation of Urban Lake Ecosystem Services. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 78 (3).
- Silaban, Winarto., dan Mastiur V.S. 2021. Analisis Kualitas Air di Perairan Danau Toba Kecamatan Pangururan, Kabupaten Samosir. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 10 (2).
- Silaen, Srinata. 2022. Kajian Tingkat Pencemaran Air di Kawasan Perairan Danau Toba Terhadap Ekosistem Ikan. *Jurnal Agroprimatech*, 6.
- Soejarwo, P.A., Sonny K., Tenny A., Christina Y., Rismutia H.D., Yesi D.S., Rahmadi S., dan Jaulim S. 2022. Pengelolaan Perikanan Budidaya Keramba Jaring Apung (KJA) dalam Upaya Penyelamatan Danau Maninjau. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 12 (1) : 79-87.
- Spence, Danielle S., Helen M. B., dan Patrick L. S. 2023. CollaborativeValuation of Ecosystem Service to Inform Lake Remediation. *Environmental Science and Police*.
- Sumarya, I. M., Ni Ketut A. J., dan I Putu S. Sumber Pencemar Kualitas dan Tingkat Pencemaran Air Danau Buyan di Kecamatan Sukasada Kabupaten Buleleng Bali. *Ecotrophic*, 14 (2).
- Swarbrick, V.J., Zoraida J., Quinones R., dan Peter R.L. 2020. Seasonal Variation In Effects Of Urea And Phosporus On Phytoplankton Abundance And Community Composition In A Hypereutrophic Hardwater Lake. *Freshwater Biology*.
- Syariah, Ni'mawati., Rahyuni S. D., Titin L. F., dan Asruddin. 2021. Price Tag Dampak Degradasi Danau Limboto Terhadap Kondisi Sosial-Ekonomi Nelayan. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*, 4 (1): 290-307.

- Tabito, Ramlawati., Syarwani Canon., dan Bobby Rantow P. 2018. Valuasi Ekonomi dan Strategi Pengembangan Objek Wisata Danau Perintis Kabupaten Bono Bolango. *Jurnal Akuntansi dan Ekonomi*, 9 (2).
- Tambunan, Triadi V.Y. 2017. Nilai Ekonomi Pemanfaatan Perikanan Langsung Pada Danau Toba di Kabupaten Samosir. Universitas Brawijaya: Artikel Skripsi.
- Tang, Hua., Abudureherman H., Kaixuan Y., Qianqian W., Lei Y., Buweiayixiemu T., Jianmei L., dan Yuefan D. 2024. Ecosystem Services Valuation and Multi-Scenario Simulation in the Ebinur Lake Basin Using a Coupled GMOP-PLUS Model. *Scientific Reports*, 14: 5071.
- Tanjung, Rosye H.R., Ervina I., Lalu Panji I.A., dan Baigo H. 2024. Water Quality Assessment to Determine the Trophic State and Suitability of Lake Sentani (Indonesia) for Various Utilisation Purposes. *Water Cycle*, 5: 99-108.
- Tison-Rosebery, J., S. Boutry., V. Bertrin., T. Leboucher., dan S. Morin. 2023. A new diatom-based multimetric index to assess lake ecological status (Indeks Multimetrik Berbasis Diatom Baru untuk Menilai Status Ekologis Danau). *Environ Monit Assess*, 195:1202.
- Ureta, Joan U., J. Carl Ureta., Luke M. B., dan Brandon K. P. 2024. The Value of Improving Freshwater Ecosystem Services: South Carolina Residents' Willingness to Pay for Improved Water Quality. *Journal of Environmental Management*, 353.
- Villaruel, Mc Jervis S. 2024. Willingness to Pay Estimation for the Restoration of Water Quality of a Eutrophic Lake. *Environment and Natural Resources Journal*, 22 (10).
- Wubalem, Atalel., Teshale W., dan Zerihun N. 2023. Economic Valuation of Lake Tana: A Recreational Use Value Estimation Through the Travel Cost Method. *Sustainability*, 15.
- Yusal MS, Hasyim A, Hastuti H, Arif A, Pratomo RHS. 2025. Review Eutrofikasi: Risiko dalam Kesuburan Lingkungan Perairan dan Upaya Penanggulangannya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24 (1): 123 124.
- Zhao, Qingjian., dan Qiuyan Wang. 2021. Water Ecosystem Services Quality Evaluation and Value Assesment of Taihu Lake in China. *Water*.