

ANALISIS DAYA TAMPUNG BEBAN PENCEMARAN FOSFOR DAN DAMPAK KERAMBA JARING APUNG DI DANAU LAUT TAWAR, ACEH TENGAH

Saiful Adhar^{*)#}, Erlangga^{*)}, Rachmawati Rusydi^{*)}, Mainisa^{*)}, Amni Dayani^{*)}, dan Urmila Zaitun^{*)}

^{*)}Program Studi Akuakultur, Fakultas Pertanian, Universitas Malikussaleh, Aceh Utara

^{*)}Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Malikussaleh, Aceh Utara

(Naskah diterima: 30 November 2022; Revisi final: 25 Januari 2024; Disetujui publikasi: 25 Januari 2023)

ABSTRAK

Danau Laut Tawar di Kabupaten Aceh Tengah, Indonesia, memiliki luas permukaan 5.862 ha, garis pantai 49,75 km, kedalaman maksimum 84,23 m, kedalaman rata-rata 25,19 m, dan daerah tangkapan air seluas 18.877 ha. Danau ini merupakan danau tektonik dan bersifat multiguna seperti berperan sebagai sumber plasma nutfah, air baku air minum dan pertanian, perikanan, dan sumber pembangkit listrik tenaga air. Aktivitas antropogenik akibat pemanfaatan sumber daya di daerah tangkapan air dan perairan meningkatkan pemuatan fosfor ke perairan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung kapasitas beban fosfor dan dampak kegiatan keramba jaring apung terhadap pencemaran fosfor di Danau Laut Tawar. Data primer dan sekunder dikumpulkan dan dianalisis menggunakan berbagai pendekatan seperti studi literatur, pemodelan, pengukuran *in-situ* serta *ex-situ*, dan wawancara. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi fosfor di perairan Danau Laut Tawar sebesar 34,00 mg m⁻³. Beban fosfor dari daerah tangkapan air sebesar 5,19 mg m⁻³, dengan alokasi beban fosfor sebesar 0,74 mg m⁻³. Baku mutu fosfor ditetapkan sebesar 40,00 mg m⁻³, sehingga daya tampung beban pencemaran fosfor mencapai 1,04 ton tahun⁻¹. Keramba jaring apung pada danau memiliki luas 4,46 ha dan menghasilkan limbah fosfor sebanyak 5,25 ton tahun⁻¹ yang terlarut ke perairan danau. Nilai tersebut lebih tinggi dari daya tampung beban pencemaran fosfor pada danau dan memengaruhi kondisi alamnya serta aktivitas yang dilakukan di sekitar danau.

KATA KUNCI: antropogenik; baku mutu; daerah tangkapan air; limbah; perairan

ABSTRACT: *Analysis of Phosphor Pollution Load Capacity and Impact of Floating Net Cages in Lake Laut Tawar, Central Aceh*

Lake Laut Tawar in Central Aceh, Indonesia, covers an area of 5,862 ha with a coastline length of 49.75 km, a maximum depth of 84.23 m, an average depth of 25.19 m, and a catchment area of 18,877 ha. The lake is a tectonic-formed water body and serves various biological and economic functions such as biodiversity resources, water sources for drinking water and agriculture, fisheries, and hydroelectricity. Anthropogenic pressures from economic activities around and within the lake have increased phosphor loading in the water body. This study aimed to determine the phosphor loading capacity and the contribution of floating net cage operation on phosphor pollution in Lake Laut Tawar. Primary and secondary data were collected and analyzed using various approaches such as documents, modeling, in-situ and ex-situ measurements, and interviews. The results showed that the phosphor concentration in

#Korespondensi: Program Studi Akuakultur, Fakultas Pertanian,
Universitas Malikussaleh, Aceh Utara
Email: saifuladhar@unimal.ac.id

the Lake Laut Tawar waters reached 34.00 mg m^{-3} . The phosphor load from the catchment area was 5.19 mg m^{-3} , with the phosphor load allocation of 0.74 mg m^{-3} . The maximum threshold for phosphor concentration in a lake is set at 40.00 mg m^{-3} , bringing the phosphor pollution load capacity of the lake to $1.04 \text{ tons year}^{-1}$. However, the floating net cages in the lake covered an area of 4.46 ha and produced $5.25 \text{ tons year}^{-1}$ of phosphorus waste which dissolved into the lake waters. This value exceeds the phosphorus load capacity of the lake and subsequently affects the lake's natural state and the ecosystem services it provides.

KEYWORDS: anthropogenic; catchment area; quality standard; waste; waters

PENDAHULUAN

Danau Laut Tawar merupakan danau bertipe tektonik yang berada di Kabupaten Aceh Tengah dengan luas permukaan 5.862 ha (Adhar *et al.*, 2020; Adhar *et al.*, 2023). Danau ini merupakan danau terluas di Provinsi Aceh (Muchlisin *et al.*, 2018; Adhar *et al.*, 2020). Secara geografis, danau tersebut berada antara $4^{\circ}38'34''$ - $4^{\circ}34'46''$ Lintang Utara dan $96^{\circ}51'25''$ - $96^{\circ}59'48''$ Bujur Timur (Adhar *et al.*, 2021a) pada elevasi 1.230 mdpl (Adhar *et al.*, 2020) dengan kedalaman rata-rata $25,19 \text{ m}$ dan kedalaman maksimum $84,23 \text{ m}$ (Husnah & Fahmi, 2015), serta memiliki garis pantai sepanjang $49,75 \text{ km}$ (Adhar *et al.*, 2021a). Danau Laut Tawar berperan sangat penting dalam kelangsungan ekonomi, estetika, ekologi, kesehatan masyarakat, dan energi.

Secara ekonomi, danau tersebut berperan sebagai sumber pendapatan masyarakat nelayan melalui perikanan tangkap dan perikanan budidaya (Indra, 2015; Marini & Hufiadi, 2015; Muchlisin *et al.*, 2018; Adhar *et al.*, 2021b). Kawasan Danau Laut Tawar juga menjadi destinasi wisata yang memberi keuntungan untuk masyarakat sekitar danau (Iriadi *et al.*, 2015). Secara ekologi Danau Laut Tawar merupakan sumber plasma nutfah, di mana beberapa spesies ikan endemik yang tidak terdapat di belahan dunia lain, namun ditemukan di Danau Laut Tawar, seperti seperti ikan depik (*Rasbora tawarensis*), ikan eyas (*Rasbora* sp), and ikan kawan (*Poropuntius Tawarensis*) (Muchlisin *et al.*, 2010; Rahmandi *et*

al., 2015; Muchlisin *et al.*, 2018; Adhar *et al.*, 2023). Air Danau Laut Tawar digunakan sebagai sumber air bersih yang disalurkan oleh PDAM Tirta Tawar kepada masyarakat Kota Takengon (Muchlisin *et al.*, 2018). Debit *outlet* danau tersebut yang mengalir ke Krueng Peusangan menjadi sumber energi penggerak turbin PLTA Peusangan (Adhar *et al.*, 2023).

Danau Laut Tawar sebagai ekosistem yang dinamis menerima tekanan lingkungan yang berasal kegiatan antropogenik akibat dari pemanfaatan sumber daya di daerah tangkapan air dan perairan (Husnah & Fahmi, 2015; Rahmandi *et al.*, 2015). Salah satu limbah kegiatan antropogenik yang menyebabkan pencemaran di Danau Laut Tawar adalah fosfor. Daerah tangkapan air Danau Laut Tawar seluas 18.877 ha (Adhar *et al.*, 2023) menginput sejumlah fosfor ke perairan dari kegiatan pertanian (Ribeiro *et al.*, 2014; Matysik *et al.*, 2015; Crooks *et al.*, 2021), pemukiman (Giri & Qiu, 2016; Tanaka *et al.*, 2021), semak dan hutan (Camara *et al.*, 2019), serta aktivitas pariwisata (Iriadi *et al.*, 2015; Rahmani *et al.*, 2016; Sieńska *et al.*, 2016). Kegiatan keramba jaring apung (KJA) merupakan sumber fosfor di Danau Laut Tawar (Adhar *et al.*, 2021b).

Kelebihan fosfor menyebabkan pencemaran, terutama eutrofikasi di perairan danau (Gorman *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2016; Mamun & An, 2017), yang berarti peningkatan status trofik danau (Schindler, 2012; Hollister *et al.*, 2016). Penelitian ini bertujuan untuk menghitung daya tampung beban fosfor dan dampak kegiatan KJA terhadap pencemaran fosfor di perairan Danau Laut Tawar.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2022 di Danau Laut Tawar, Takengon, Kabupaten Aceh Tengah. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan sekunder. Metode pengumpulan data melalui studi literatur, analisis peta, survei lapang, wawancara, dan analisis laboratorium, seperti yang disajikan pada laju alir penelitian pada Gambar 1.

Sumber data sekunder yang digunakan berupa disertasi dan jurnal ilmiah yang merupakan hasil penelitian sebelumnya. Sebaran dan luas areal KJA diperoleh dari analisis peta dari aplikasi Google Earth Tahun 2022. Survei lapang dilakukan untuk menentukan KJA yang aktif dan tidak dan mengobservasi ukuran petakan KJA. Data hasil panen ikan dan jumlah pakan yang digunakan diperoleh melalui wawancara dengan pembudidaya atau pekerja KJA. Jumlah responden adalah 15 orang, di mana delapan responden di One-one, empat responden di Kebayakan, dan tiga responden di Toweren.

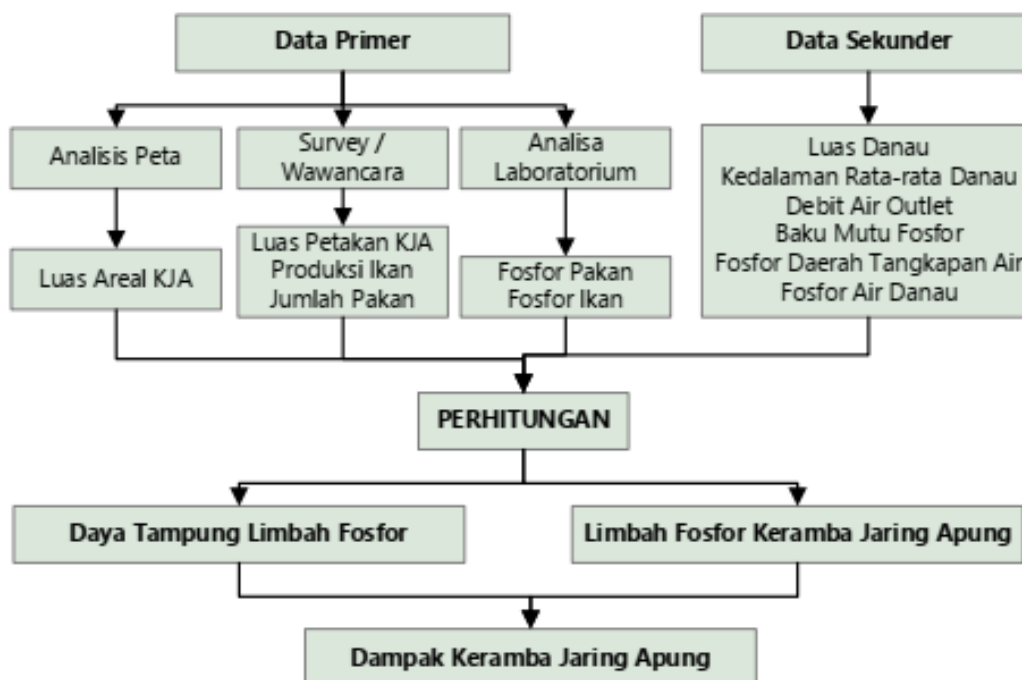
Sampel ikan nila dan ikan mas masing-masing dikumpulkan sebanyak 27 sampel.

Sampling dilakukan di tiga lokasi, masing-masing pada tiga petak KJA dengan tiga kali pengulangan dengan frekuensi seminggu sekali. *Sampling* pakan hanya dilakukan dua kali menurut jenis pakan yang digunakan. Konsentrasi fosfor pada ikan dan pakan dianalisis di laboratorium dengan metode spektrofotometri UV-visible pada panjang gelombang 400 nm dan menggunakan pereaksi asam nitrat (Manik, 2019).

Daya tampung beban pencemaran fosfor ditentukan berdasarkan persamaan (1) yang mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau dan/atau Waduk.

$$La = \frac{[P] d Z \rho A}{(1-R)100} \dots\dots\dots(1)$$

Di mana La adalah daya tampung beban pencemaran fosfor (Kg tahun⁻¹), [P]d adalah alokasi beban fosfor pada perairan danau (mg m⁻³), Z adalah kedalaman rata-rata danau (m), ρ adalah laju pergantian air danau (tahun⁻¹), dan A adalah luas danau (ha). R adalah proporsi



Gambar 1. Laju alir penelitian
Figure 1. Flowchart of research

fosfor yang mengendap ke dasar danau dalam sedimen yang diperoleh dengan persamaan (2) (KLH, 2009):

$$R = \frac{1}{(1+0,747 \rho^{0,507})} \dots\dots\dots(2)$$

ρ adalah laju pergantian air danau (tahun⁻¹), yang diperoleh dengan persamaan (3) (KLH, 2009):

$$\rho = \frac{Q_0}{V} \dots\dots\dots(3)$$

Di mana Q_0 adalah jumlah debit air keluar danau (juta m³ tahun⁻¹), dan V adalah volume air danau (juta m³) yang dihitung dengan persamaan (4) (KLH, 2009):

$$V = \frac{A \times Z}{100} \dots\dots\dots(4)$$

Di mana A adalah luas permukaan danau (ha), dan Z adalah kedalaman rata-rata danau (m). Alokasi beban pencemaran fosfor dihitung dengan persamaan (5) (KLH, 2009) :

$$[P]_d = [P]_{std} - [P]_i - [P]_{dta} \dots\dots\dots(5)$$

Di mana $[P]_{std}$ adalah konsentrasi fosfor maksimal sesuai peruntukan perairan (mg m⁻³). $[P]_i$ adalah konsentrasi fosfor hasil pemantauan perairan danau (mg m⁻³), dan $[P]_{dta}$ adalah beban fosfor dari daerah tangkapan air (mg m⁻³).

Limbah fosfor KJA diperoleh dari selisih fosfor yang diberikan pada pakan dan fosfor yang tersimpan di dalam tubuh ikan sampai dipanen. Asumsi tersebut diformulakan secara matematis dengan persamaan (6):

$$P_w = P_f - P_{ik} \dots\dots\dots(6)$$

Di mana P_w adalah jumlah limbah fosfor KJA (kg m⁻² siklus⁻¹). P_f adalah jumlah fosfor pada pakan (kg m⁻² siklus⁻¹), dan P_{ik} adalah jumlah

fosfor dalam tubuh ikan (kg m⁻² siklus⁻¹). Jumlah fosfor pada pakan (P_f) diperoleh berdasar jumlah pakan yang diberikan dan konsentrasi fosfor dalam pakan, yang dimatematiskan dengan persamaan (7):

$$P_f = F CP_f \dots\dots\dots(7)$$

Di mana F adalah jumlah pakan selama masa pemeliharaan dalam per satuan luas KJA (kg m⁻²), dan CP_f adalah konsentrasi fosfor dalam pakan (%). Jumlah fosfor dalam tubuh ikan (P_{ik}) diperoleh berdasarkan jumlah ikan pada waktu panen dan konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan, yang dimatematiskan dengan persamaan (8):

$$P_{ik} = I CP_i \dots\dots\dots(8)$$

Di mana I adalah jumlah ikan yang dipanen dalam satuan luas KJA (kg m⁻²), dan CP_i adalah konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan (%).

Limbah fosfor yang dihasilkan dari KJA tidak semuanya larut ke perairan danau, sebagian fosfor mengendap ke dasar danau bersama sedimen. Sama halnya seperti fosfor dari sumber lain seperti yang dikemukakan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009. Jumlah fosfor KJA yang tertinggal ke dasar danau dianggap sama dengan proporsi fosfor perairan danau yang mengendap ke dasar danau yaitu dengan menggunakan persamaan (2) (KLH, 2009). Total limbah fosfor dari KJA selama 1 tahun yang larut ke perairan danau diperoleh dengan mensubstitusikan luas areal KJA, jumlah siklus pemeliharaan selama satu tahun, dan proporsi fosfor yang mengendap ke dasar danau, sehingga persamaan tersebut menjadi persamaan (9) sebagai berikut:

$$[P]_{KJA} = P_w A_{KJA} S (1 - R) \dots\dots\dots(9)$$

Di mana P_w adalah jumlah limbah fosfor KJA (kg m⁻² siklus⁻¹), A_{KJA} adalah total luas area KJA (m²), dan S adalah jumlah siklus masa budidaya ikan di KJA (per tahun).

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komparatif. Dampak KJA dianalisis berdasarkan nilai total jumlah limbah fosfor yang dihasilkan ($[P]_{KJA}$) dan nilai daya tampung beban fosfor perairan danau (La). Bila nilai $[P]_{KJA}$ lebih besar dari nilai La, maka kehadiran KJA dianggap memberikan dampak negatif. Hal ini didasarkan pada pertimbangan bahwa jumlah limbah fosfor KJA yang dihasilkan melebihi daya tampung danau.

HASIL DAN BAHASAN

Daya Tampung Beban Pencemaran Fosfor

Permukaan Danau Laut Tawar memiliki luas sebesar 5.862 ha (Adhar *et al.*, 2023) dengan kedalaman rata-rata sedalam 25,19 m (Husnah & Fahmi, 2015). Berdasarkan perhitungan volume air Danau Laut Tawar pada studi ini diperoleh sebanyak 1.476,64 juta m^3 . Debit *outlet* dari data pengukuran pada periode Oktober 2016-September 2017 berkisar antara 10,00-16,38 m^3 detik⁻¹ dengan rata-rata sebesar 12,04 m^3 detik⁻¹ (Adhar *et al.*, 2023). Konversi nilai tersebut diperoleh debit air danau sebesar 379,69 juta m^3 tahun⁻¹. Laju pergantian air (ρ , tahun) danau diperoleh sebesar 0,26 tahun⁻¹ (Tabel 1).

Fosfor yang masuk ke perairan danau diasumsikan sebagiannya tertinggal dalam sedimen di dasar danau. Fosfor yang tertinggal di sedimen (R) diperoleh sebesar 0,73 yang menunjukkan proporsi fosfor yang mengendap ke dasar danau dari total fosfor yang masuk ke danau. Alokasi beban fosfor di perairan danau diperoleh dengan mengalkulasi selisih baku mutu fosfor dengan konsentrasi fosfor perairan danau dan alokasi beban fosfor dari daerah tangkapan air (KLH, 2009).

Baku mutu air danau sebagai acuan perhitungan daya tampung beban pencemaran fosfor didasarkan pada peruntukan danau. Danau Laut Tawar bersifat multiguna sebagai air baku minum (Zamzami, 2017; Muchlisin *et al.*, 2018), perikanan (Marini & Hufiadi, 2015; Indra,

2015; Muchlisin *et al.*, 2018; Adhar *et al.*, 2021b), sumber air kegiatan pertanian, dan sebagai sumber daya tenaga listrik (Adhar *et al.*, 2023).

Total fosfat sebagai P untuk baku mutu air Kelas I adalah 200 $mg\ m^{-3}$ (Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2001). Nilai tersebut tidak sesuai sebagai acuan baku mutu fosfor dalam perhitungan daya tampung beban pencemaran fosfor Danau Laut Tawar, karena melampaui batas eutrofik ($<100\ mg\ m^{-3}$). Jika ditetapkan batas status trofik Danau Laut Tawar pada tingkat mesotrofik dengan konsentrasi fosfor total $<30\ mg\ m^{-3}$ (KLH, 2009) juga tidak tepat, karena hasil pengukuran terakhir adalah 34 $mg\ m^{-3}$ (Adhar *et al.*, 2023), yang berarti telah melampaui nilai tersebut.

Berdasarkan kondisi tersebut maka ditentukan nilai baku mutu fosfor untuk perhitungan daya tampung beban pencemaran fosfor Danau Laut Tawar yang berada di bawah 100 $mg\ m^{-3}$. Penentuan nilai tersebut untuk mengantisipasi agar perairan Danau Laut Tawar tidak mencapai tingkat eutrofik berat. Baku mutu fosfor untuk Danau Laut Tawar ditentukan pada nilai sebesar 40,00 $mg\ m^{-3}$. Nilai tersebut merupakan ambang batas konsentrasi fosfor yang diperbolehkan untuk perairan Danau Laut Tawar.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa alokasi beban fosfor dari daerah tangkapan air Danau Laut Tawar adalah sebesar 7,76 ton tahun⁻¹ atau $776 \times 10^7\ mg\ tahun^{-1}$ (Adhar *et al.*, 2023). Konsentrasi *input* fosfor dari daerah tangkapan air adalah sebesar 5,26 $mg\ m^{-3}$, yang diperoleh dari pembagian fosfor daerah tangkapan air dengan volume air danau. Perhitungan alokasi beban fosfor di perairan Danau Laut Tawar diperoleh sebesar 0,74 $mg\ m^{-3}$. Tabel 2 memperlihatkan nilai parameter daya tampung beban pencemaran fosfor Danau Laut Tawar.

Data pada Tabel 1 dan 2 digunakan untuk menghitung daya tampung beban pencemaran fosfor. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Danau Laut Tawar memiliki daya tampung beban pencemaran fosfor sebesar 1,04 ton tahun⁻¹ atau sekitar 0,003 ton hari⁻¹.

Tabel 1. Morfologi dan hidrologi Danau Laut Tawar
 Table 1. Morphology and hydrology of Lake Laut Tawar

Parameter Parameters	Satuan Units	Nilai Values	Sumber Sources
Luas danau Lake area	ha	5.862	Adhar et al. (2023)
Kedalaman rata-rata Average depth	m	25,19	Husnah & Fahmi (2015)
Volume air danau Lake water volume	juta m ³ million m ³	1.476,64	Perhitungan Calculation
Debit air outlet Outlet water discharge	juta m ³ tahun ⁻¹ million cubic year ⁻¹	379,69	Adhar et al. (2023)
Laju pergantian air danau (ρ) Lake water turnover rate (ρ)	per tahun per year	0,26	Perhitungan Calculation

Tabel 2. Parameter daya tampung beban pencemaran fosfor Danau Laut Tawar
 Table 2. Parameters of the phosphorus pollution load capacity of Lake Laut Tawar

Parameter Parameters	Satuan Units	Nilai Values
Baku mutu fosfor ($[P]_{STD}$) Danau Laut Tawar Phosphorus quality standards ($[P]_{STD}$) Lake Laut Tawar	mg m ⁻³	40,00
Beban fosfor dari daerah tangkapan air ($[P]_{DTA}$) Phosphorus load from catchment areas ($[P]_{DTA}$)	mg m ⁻³	5,19
Konsentrasi fosfor perairan danau ($[P]_i$) Phosphorus concentration of lake waters ($[P]_i$)	mg m ⁻³	34,00
Alokasi beban fosfor di perairan ($[P]_d$) Allocation of phosphorus load in waters ($[P]_d$)	mg m ⁻³	0,74
Proporsi fosfor yang tertinggal di sedimen (R) Proportion of phosphorus remaining in sediment (R)	-	0,73

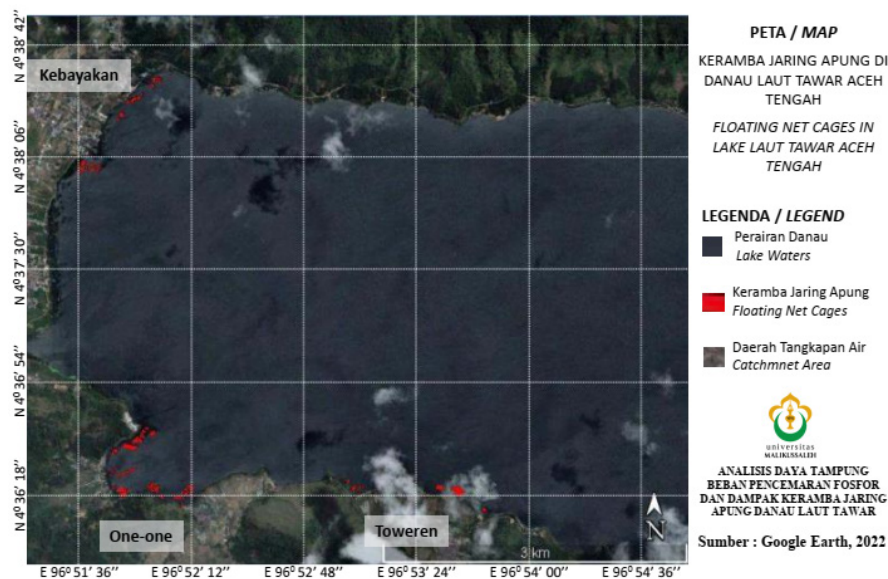
Fosfor Keramba Jaring Apung

Analisis peta menunjukkan luas KJA di Danau Laut Tawar ditemui sebesar 4,46 ha (Gambar 2). Gambar 2 menunjukkan bahwa KJA di Danau Laut Tawar tersebar pada tiga lokasi, yaitu di Perairan Kebanyakan, One-one, dan Toweren. Area KJA terluas ditemui di perairan One-one, yaitu sebesar 2,37 ha atau 53,07% dari total luas KJA di Danau Laut Tawar. Area KJA di Danau Laut Tawar mengalami peningkatan, pada tahun 2017 ditemui sebanyak 78 unit dengan total luas 2,79 ha (Adhar et al., 2023) menjadi 110 unit dengan total luas 4,46 ha pada tahun 2022. Rata-rata peningkatan area KJA di Danau Laut Tawar antara tahun 2017-2022 adalah 0,33 ha tahun⁻¹.

Hasil observasi menunjukkan bahwa setiap unit KJA di Danau Laut Tawar terdiri

dari sejumlah petakan dan satu rumah jaga. Luas area per unit KJA di Danau Laut Tawar bervariasi mengikuti jumlah petak yang digunakan. Ukuran petak beragam mulai dari ukuran 3 × 4 m² sampai ukuran 4 × 7 m² dengan kedalaman jaring mencapai 5 m. Ukuran petak tersebut tidak berbeda dengan hasil observasi tahun 2017 (Adhar et al., 2023), di mana rata-rata luas petak adalah 20,20 m².

Jenis ikan yang dibudidaya di KJA Danau Laut Tawar terdiri dari dua jenis ikan, yaitu ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dan ikan mas (*Cyprinus carpio*). Ikan nila merupakan jenis yang dominan ditemui di area KJA Danau Laut Tawar, di mana mencapai 90% dari total luas area KJA di Danau Laut Tawar. Hal ini disebabkan oleh menurunnya permintaan pasar dan waktu pemeliharaan ikan mas yang lebih lama dibandingkan dengan ikan nila (Adhar et



Gambar 2. Peta sebaran keramba jaring apung di Danau Laut Tawar
 Figure 2. Map of floating net cages in Lake Laut Tawar

al., 2021b). Siklus pemeliharaan ikan nila dalam 1 tahun mencapai tiga kali, sedangkan ikan mas hanya dua siklus pemeliharaan per tahun. Produksi ikan, jumlah pakan, dan konsentrasi fosfor pada ikan dan pakan di KJA Danau Laut Tawar ditampilkan pada Gambar 3.

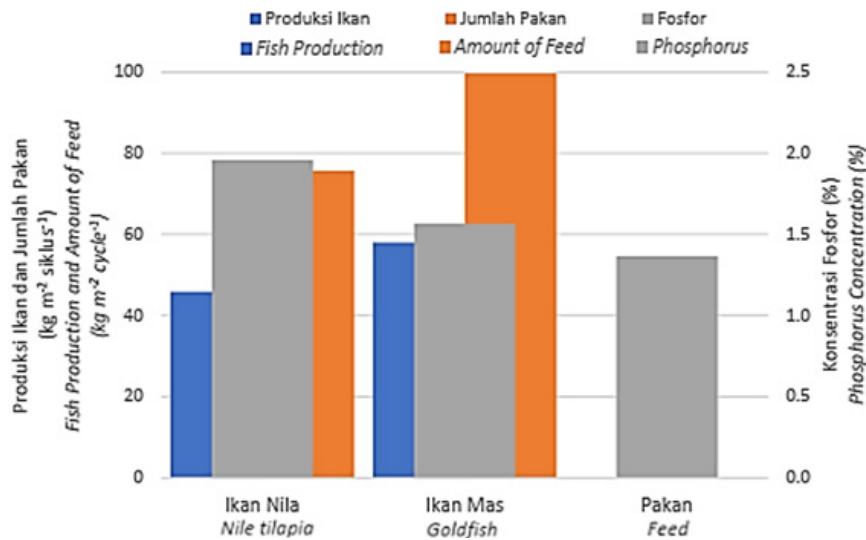
Gambar 3 menunjukkan hasil observasi rata-rata produksi ikan dan jumlah pakan yang digunakan selama satu siklus masa pemeliharaan, serta rata-rata hasil analisis laboratorium terhadap konsentrasi fosfor pada ikan dan pakan. Produksi ikan nila berkisar antara 30-75 kg m⁻² siklus⁻¹ dengan rata-rata 45,77 ± 11,17 kg m⁻² siklus⁻¹. Pakan yang digunakan pada pemeliharaan ikan nila berkisar antara 48-113 kg m⁻² siklus⁻¹ dengan rata-rata sebesar 75,13 ± 17,57 kg m⁻² siklus⁻¹. Ikan mas menghasilkan panen antara 36-99 kg m⁻² siklus⁻¹, dengan rata-rata 58,77 ± 15,75 kg m⁻² siklus⁻¹. Pakan yang digunakan pada budidaya ikan mas berkisar antara 56-165 kg m⁻² siklus⁻¹, dengan rata-rata 100,93 ± 28,83 kg m⁻² siklus⁻¹.

Berdasarkan jumlah pakan yang digunakan dan hasil produksi ikan di KJA Danau Laut Tawar, diperoleh rata-rata rasio konversi pakan (RKP) untuk ikan nila sebesar 1,65 dan ikan mas sebesar 1,72. Nilai RKP tersebut menunjukkan jumlah pakan yang dikonsumsi menjadi biomassa tubuh ikan (Iskandar & Elrifadah,

2015), sehingga menggambarkan bahwa pertumbuhan ikan sebesar 1 kg membutuhkan pakan sebanyak 1,65 kg untuk ikan nila dan 1,72 kg untuk ikan mas di KJA Danau Laut Tawar. Hal tersebut menunjukkan jumlah pakan yang terbuang ke lingkungan perairan sebesar 39,44% pada KJA ikan nila dan 41,79% pada KJA ikan mas. Jumlah pakan yang terbuang ini merupakan salah satu sumber limbah fosfor di perairan Danau Laut Tawar (Adhar *et al.*, 2021b), selain dari sumber lainnya.

Konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan nila berkisar antara 1,71-2,20%, dengan rata-rata 1,96 ± 0,11%. Ikan mas di KJA Danau Laut Tawar mengandung fosfor antara 1,15–2,06%, dengan rata-rata 1,56 ± 0,27%. Konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan nila lebih tinggi daripada ikan mas. Analisis komparasi data konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan menunjukkan tidak ada pengaruh lokasi budidaya dan waktu *sampling*. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan relatif sama pada semua lokasi budidaya di Danau Laut Tawar. Umur ikan juga tidak memengaruhi konsentrasi fosfor dalam tubuh ikan, di mana peningkatan fosfor mengikuti pertumbuhan ikan.

Pakan yang digunakan di KJA Danau Laut Tawar ditemui sebanyak tujuh jenis pakan dengan merek yang berbeda. Konsentrasi



Gambar 3. Produksi ikan, jumlah pakan, konsentrasi fosfor ikan dan pakan di keramba jaring apung Danau Laut Tawar

Figure 3. Fish production, number of feed, phosphorus concentration of fish and feed in floating net cage of Lake Laut Tawar

Tabel 3 Limbah fosfor keramba jaring apung di Danau Laut Tawar

Table 3 Phosphor waste in floating net cages of Lake Laut Tawar

No No	Keramba jaring apung Floating net cages	Nilai Value	Satuan Units
1	Ikan nila Nile tilapia	0,13	kg m ⁻² siklus ⁻¹ kg m ⁻² cycle ⁻¹
2	Ikan mas Goldfish	0,46	kg m ⁻² siklus ⁻¹ kg m ⁻² cycle ⁻¹
3	Ikan nila Nile tilapia	0,38	kg m ⁻² tahun ⁻¹ kg m ⁻² year ⁻¹
4	Ikan mas Goldfish	0,91	kg m ⁻² tahun ⁻¹ kg m ⁻² year ⁻¹
5	Ikan nila Nile tilapia	15,17	ton tahun ⁻¹ ton year ⁻¹
6	Ikan mas Goldfish	4,08	ton tahun ⁻¹ ton year ⁻¹

fosfor dalam pakan tersebut bervariasi antara 1,00–1,85%. Diasumsikan para pembudidaya menggunakan jenis pakan yang seragam menurut umur ikan, sehingga rata-rata konsentrasi fosfor dalam pakan KJA Danau Laut Tawar adalah 1,37% dari jumlah pakan.

Jumlah fosfor yang terbuang ke lingkungan perairan dari aktivitas KJA (P_w) dihitung dengan menggunakan persamaan 6, dan total fosfor dari area KJA dengan luas tertentu yang masuk

ke perairan ($[P]_{KJA}$) dihitung dengan persamaan 9. Hasil perhitungan jumlah limbah fosfor pada masing-masing pemeliharaan ikan budidaya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 menampilkan jumlah fosfor yang dihasilkan dari aktivitas KJA di Danau Laut Tawar. KJA ikan mas menghasilkan limbah fosfor lebih besar dari KJA ikan nila pada luas yang sama dalam satu siklus pemeliharaan. Hal ini disebabkan oleh waktu pemeliharaan ikan mas

lebih lama, sehingga menghabiskan pakan yang lebih banyak daripada pemeliharaan ikan nila. KJA ikan mas menghasilkan limbah fosfor sebanyak $0,46 \text{ kg m}^{-2} \text{ siklus}^{-1}$, sedang KJA ikan nila menghasilkan limbah fosfor sebanyak $0,13 \text{ kg m}^{-2} \text{ siklus}^{-1}$. Berdasarkan waktu siklus pemeliharaan selama setahun, maka diperoleh limbah fosfor sebesar $0,38 \text{ kg m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ dari KJA ikan nila dan $0,91 \text{ kg m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ dari KJA ikan mas.

Luas area KJA ikan nila seluas 90% dan KJA ikan mas seluas 10% dari total area KJA di Danau Laut Tawar. Berdasarkan luas area tersebut diperoleh total limbah fosfor dari KJA ikan nila sebesar $15,17 \text{ ton tahun}^{-1}$ dan dari KJA ikan mas sebesar $4,08 \text{ ton tahun}^{-1}$. Total limbah fosfor dari aktivitas KJA di Danau Laut Tawar adalah $19,25 \text{ ton tahun}^{-1}$.

Total limbah fosfor yang dihasilkan dari aktivitas KJA tersebut tidak semua larut ke perairan, sebagiannya akan mengendap bersama sedimen di dasar danau. Penelitian ini menggunakan nilai proporsi fosfor yang tertinggal di sedimen (R) dengan hasil perhitungan sebesar 0,73 (Tabel 2). Jumlah fosfor yang mengendap ke dasar danau dalam sedimen dari total fosfor pada aktivitas KJA Danau Laut Tawar adalah $14,00 \text{ ton tahun}^{-1}$. Fosfor yang larut di perairan Danau Laut Tawar adalah sebesar $5,25 \text{ ton tahun}^{-1}$. Nilai ini lebih besar dari daya tampung beban pencemaran fosfor Danau Laut Tawar, yaitu $1,04 \text{ ton tahun}^{-1}$. Hal ini menunjukkan keberadaan aktivitas KJA berdampak negatif terhadap beban pencemaran fosfor di perairan Danau Laut Tawar. Walaupun demikian, nilai tersebut masih jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan beban fosfor yang berasal dari kegiatan budidaya di Waduk Cirata yaitu sebesar $1206 \text{ ton tahun}^{-1}$ (Warsa *et al.*, 2018). Kelebihan fosfor di perairan Danau Laut Tawar berdampak pada peningkatan pertumbuhan fitoplakton, sehingga meningkatkan status trofik danau (Schindler, 2012; Hollister *et al.*, 2016), yang menunjukkan terjadinya eutrofikasi di perairan danau (Gorman *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2016; Mamun & An, 2017). Fenomena tersebut telah muncul di Danau Laut Tawar, di mana tingkat trofik mesotrofik telah mengarah pada eutrofik (Adhar *et al.*, 2023).

KESIMPULAN

Danau Laut Tawar memiliki daya tampung beban pencemaran fosfor sebesar $1,04 \text{ ton tahun}^{-1}$ atau sekitar $0,003 \text{ ton hari}^{-1}$, dengan baku mutu fosfor sebesar 40 mg m^{-3} . Jumlah fosfor dari kegiatan keramba jaring apung yang larut di perairan Danau Laut Tawar adalah sebesar $5.25 \text{ ton tahun}^{-1}$. Keberadaan keramba jaring apung di perairan Danau Laut Tawar seluas $4,46 \text{ ha}$ diperkirakan berdampak negatif terhadap kualitas perairan. Oleh karena itu, direkomendasikan penggunaan pakan yang mengandung fosfor lebih rendah untuk budidaya ikan di KJA, tetapi masih memenuhi kebutuhan fosfor pada ikan, sehingga kelebihan pakan tidak menyebabkan tingginya limbah fosfor dari aktivitas budidaya KJA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Malikussaleh yang telah membiayai pelaksanaan penelitian ini melalui Hibah Penelitian Dasar PNPB Tahun 2022.

DAFTAR ACUAN

- Adhar, S., Barus, T. A., Nababan, E. S. N., Wahyuningsih, H., Erlangga, & Khalil, M. (2020). Estimasi potensi produksi ikan di Danau Laut Tawar berdasarkan *morphoedaphic index*. *Serambi Engineering*, 5(3), 1209-1214.
- Adhar, S., Barus, T. A., Nababan, E. S. N. & Wahyuningsih, H. (2021a). *The waters transparency model of Lake Laut Tawar, Aceh, Indonesia*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 869, 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/869/1/012021>
- Adhar, S., Rusydi, R., Mainisa, Erlangga, Khalil, M., & Ayuzar, E. (2021b). Analisa limbah fosfor kegiatan keramba jaring apung di Danau Laut Tawar Aceh Tengah. *Serambi Engineering*, 6(3), 2024-2032. <https://doi.org/10.32672/jse.v6i3.3051>

- Adhar, S., Khalil, M., Erlangga, Muliani, Rusydi, R., Mainisa, Imanullah, & Andika, Y. (2023). Model of nitrogen-phosphorus ratio and phytoplankton relationship in lake Laut Tawar, Indonesia. *Depik Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir dan Perikanan*, 12(3), 274-283. <https://doi.org/10.13170/depik.12.3.33935>
- Camara, M., Jamil, N. R. & Abdullah, A. F. B. (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. *Ecological Processes*, 8, 10. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0164-x>
- Crooks, E. C., Harris, I. M. & Patil, S. D. (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), 357-373. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12904>
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, 173, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.029>
- Gorman, M. W., Zimmer, K. D., Herwig, B. R., Hanson, M. A., Wright, R. G., Vaughn, S. R., & Younk, J. A. (2014). Relative importance of phosphorus, fish biomass, and watershed land use as drivers of phytoplankton abundance in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 466-467, 849-855. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.106>
- Hollister, J. W., Milstead, W. B., & Kreakie, B. J. (2016). Modeling lake trophic state: a random forest approach. *Ecosphere*, 3(7), e01321. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1321>
- Husnah, & Fahmi, Z. (2015). Karakteristik lingkungan dan status pencemaran Danau Laut Tawar. In: N. N. Wiadnyana & M. M. Kamal (Eds.), *Pengelolaan sumber daya perikanan Danau Laut Tawar Aceh Tengah*. Amafrad Press.
- Indra. (2015). Kajian kondisi perikanan di Danau Laut Tawar Aceh Tengah. *Agrisep*, 16(2), 62-69.
- Iriadi, R., Riani, E., Pramudya, B., & Fahrudin, A. (2015). Evaluasi pengendalian pencemaran di perairan Danau Laut Tawar di Kabupaten Aceh Tengah. *Limnotek*, 22(1), 64-75.
- Iskandar, R., & Elrifadah. (2015). Pertumbuhan dan efisiensi pakan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang diberikan pakan buatan berbasis kiambang. *Ziraa'ah Majalah Ilmiah Pertanian*, 40(1), 18-24. <http://dx.doi.org/10.31602/zmip.v40i1.93>
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2009). *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau Dan/Atau Waduk*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup.
- Mamun, M., & An, K.-G. (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(2), 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2017.04.001>
- Manik, C. E. (2019). *Penentuan kadar fosfor pada pakan ternak L-18 dengan menggunakan metode spektrofotometri UV-Visible (UV-VIS) di PT. Mabar Feed Indonesia Medan*. Universitas Sumatera Utara.
- Marini, M., & Hufiadi. (2015). Pemanfaatan sumberdaya perikanan Danau Laut Tawar. In: N. N. Wiadnyana & M. M. Kamal (Eds.), *Pengelolaan sumber daya perikanan Danau Laut Tawar Aceh Tengah*. Amafrad Press.
- Matysik, M., Absalon, D., & Ruman, M. (2015). Surface water quality in relation to land cover in agricultural catchments (Liswarta River Basin case study). *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(1), 175-184. <https://doi.org/10.15244/pjoes/26203>
- Muchlisin, Z. A., Hasri, I., & Batubara, A. S. (2018). *A mini review on endemic and threatened fish Rasbora tawarensis in Lake Laut Tawar, Indonesia*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 216, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/216/1/012045>
- Muchlisin, Z. A., Musman, M., & Azizah, M. N. S. (2010). Length-weight relationships and condition factors of two threatened fishes, *Rasbora tawarensis* and *Poropuntius tawarensis*, endemic to Lake Laut Tawar, Aceh Province, Indonesia. *Journal of Applied Ichthyology*, 26(6), 949-953. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2010.01524.x>

- Rahmandi, Koeshendrajana, S., & Muchlisin, Z. A. (2015). Gambaran umum dan sintesis. In: N. N. Wiadnyana & M. M. Kamal (Eds.), *Pengelolaan sumber daya perikanan Danau Laut Tawar Aceh Tengah*. Amafrad Press.
- Rahmani, T., Poorbagher, H., Javanshir, A., & Kamangar, B. B. (2016). Effects of agriculture, tourism and the dam on eutrophic status of the Zerebar Lake, Iran. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 4(4), 352-363. <https://doi.org/10.26655/ijabbr.2016.12.5>
- Ribeiro, H. K., Favaretto, N., Dieckow, J., Souza, L. C. P., Minella, J. P. G., de Almeida, L., & Ramos, M. R. (2014). Quality of surface water related to land use: A case study in a catchment with small farms and intensive vegetable crop production in Southern Brazil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 38(2), 656-668. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200030>
- Schindler, D. W. (2012). *The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes*. *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 4322-4333. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>
- Sekretariat Negara Republik Indonesia. (2001). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air*. Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Sieńska, J., Dunalska, J., Łopata, M., Parszuto, K., & Tandyrak, R. (2016). Trophic state and recreational value of Lake Mikołajskie. *Limnological Review*, 16(3), 147-153. <https://doi.org/10.1515/limre-2016-0016>
- Smith, V. H., Wood, S. A., McBride, C. G., Atalah, J., Hamilton, D. P., Abell, J. (2016). Phosphorus and nitrogen loading restraints are essential for successful eutrophication control of Lake Rotorua, New Zealand. *Inland Waters*, 6(2), 273-283.
- Tanaka, Y., Minggat, E., & Roseli, W. (2021). The impact of tropical land-use change on downstream riverine and estuarine water properties and biogeochemical cycles: a review. *Ecological Processes*, 10, 40. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00315-3>
- Warsa, A., Haryadi, J., & Astuti, L. P. (2018). Mitigasi beban fosfor dari kegiatan budidaya dengan penebaran ikan bandeng (*Chanos chanos*) di Waduk Cirata, Jawa Barat. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(2), 259-266. <https://doi.org/10.29122/jtl.v19i2.2669>