

ESTIMASI DAYA DUKUNG PERAIRAN DANAU TOBA SUMATERA UTARA UNTUK PENGEMBANGAN BUDIDAYA IKAN DENGAN KARAMBA JARING APUNG

Lukman & Agus Hamdani

Pusat Penelitian Limnologi-LIPI

Diterima redaksi : 19 Juli 2011, disetujui redaksi : 10 November 2011

ABSTRAK

Budidaya ikan dengan karamba jaring apung (KJA) di suatu perairan, akan bernilai positif selama dalam batas kapasitas daya dukungnya. Hal ini karena budidaya ikan dengan KJA berdampak terjadinya peningkatan hara, yang bersumber dari sisa pakan dan feses ikan, yang meningkatkan kesuburan perairan. Danau Toba di Sumatera Utara, merupakan salah satu andalan pariwisata nasional. Pengembangan KJA di Danau Toba harus memperhatikan kapasitas daya dukungnya yang tidak mengancam kegiatan pariwisata. Daya dukung perairan untuk pengembangan KJA merupakan suatu kriteria tingkat produksi maksimum yang dapat dicapai berdasarkan kadar total fosfor (TP; Total Phosphor) yang masih dapat diterima sesuai kepentingan pemanfaatan perairan tersebut. Telah dilakukan kajian daya dukung (DD) perairan Danau Toba untuk budidaya ikan dengan KJA. Perhitungan DD tersebut mengikuti beberapa skenario, yaitu: i) penetapan TP rata-rata yang dapat diterima ([P]f) pada kondisi oligotrofik; ii) penetapan [P]f pada kondisi oligo-mesotrofik, dan iii) penetapan [P]f pada rata-rata TP pengukuran 2009. Kadar TP yang dapat diterima perairan Danau Toba berdasarkan skenario I, II dan III, masing-masing adalah 324,4 ton/tahun, 973,3 ton/tahun, dan 1.297,76 ton/tahun, dengan tingkat produksi ikan/tahun yang dapat dicapai masing-masing 35.282 ton, 101.933 ton, dan 141.130 ton. Daya dukung Danau Toba untuk produksi ikan pada KJA yang aman untuk aktivitas pariwisata adalah mengacu pada kondisi oligotrofik (skenario I), yaitu 35.000 ton/tahun bahkan di bawahnya.

Kata kunci: Danau Toba, karamba jaring apung, daya dukung, total fosfor

ABSTRACT

CARRYING CAPACITY ESTIMATION OF LAKE TOBA, NORTH SUMATERA FOR CAGE AQUACULTURE DEVELOPMENT. *Development of cage aquaculture (CA) will be positive as long as the limit of its carrying capacity (CC). This is because the impact of CA will increase nutrient, which is sourced from uneaten feed and fish feces, resulting in increasing trophic state of waters. Lake Toba in North Sumatra and its surrounding, is one the national tourism main destiny. Cage aquaculture development at Lake Toba have to regard to the CC that does not threaten to tourism activities. Waters CC is criteria a maximum production rate can be achieved based on the levels of total phosphorus (TP) which is acceptable according to the interests of the utilization of waters. Study of Lake Toba CC has been carried out in concern to CA development. The calculation of CC follow to some scenarios, including setting TP average is acceptable ([P]f) on: i) oligotrophic condition; ii) oligo-mesotrophic condition, and iii) on the TP average measurement in 2009. Acceptable levels of TP water content of Lake Toba on the scenario I, II and III were 324.4 tons/yr, 973.3 tons / yr, and 1297.76 tons/yr, respectively, with production levels of fish/yr that can be achieved 34568.5 tons, 103705.5 tons, and 138272.1 tons, respectively. Lake Toba CC for for CA development which secure to tourism activity has to refers to oligotrophic state condition or even lower.*

Key words: Lake Toba, cage aquaculture, carrying capacity, total phosphorus

PENDAHULUAN

Berbagai permasalahan sering kali muncul pada perairan-perairan yang telah menjadi wilayah pengembangan budidaya ikan dengan karamba jaring apung (selanjutnya disebut KJA), yang pada akhirnya mengakibatkan memburuknya kondisi perairan dan berdampak balik pada kegiatan budidaya ikan itu sendiri. Di perairan Waduk Cirata, Jawa Barat, pengembangan KJA telah mendorong terjadinya penyuburan perairan (eutrofikasi) yang ditandai dengan melimpahnya (*blooming*) plankton yang tidak dikehendaki (Garno, 1999). Di Danau Maninjau, budidaya ikan dengan KJA telah menunjang proses eutrofikasi, yang mengakibatkan terjadinya *blooming* jenis *Mycrocystis* (Sulastri, 2002). Proses pencemaran sendiri (*self pollution*) yang bersumber dari kegiatan KJA juga ditandai dengan sering terjadinya kematian massal, seperti di Waduk Saguling tahun 1994 (110 ton) (Lukman, 1996), di Waduk Jatuluhur tahun 1999 (900 ton) (Danakusumah & Herawan, 2000), dan tahun 1997 di Danau Maninjau (950 ton) (Syandri, 2000).

Pada budidaya ikan dengan KJA peningkatan hara di perairan bersumber dari sisa pakan dan feses ikan. Berdasarkan pengamatan Lukman & Hidayat (2002) di Waduk Cirata, kadar bahan organik total di kolom air berkisar antara 13,9 – 22,7 mg/l dan pada sedimen antara 152 -189 mg/gram berat kering sedimen. Pada tahap awal akibat penumpukan bahan organik di dasar perairan adalah pembentukan lapisan anaerobik yang makin besar (Garno & Adibroto, 1999), diikuti terbentuknya senyawaan beracun seperti H₂S dan NH₃. Penumpukan bahan organik mengakibatkan kadar oksigen di kolom air menurun hingga sangat minim saat pagi hari, dan cukup kritis jika cuaca mendung pada hari berikutnya karena tidak adanya pasokan oksigen dari proses fotosintesis (Lukman, 1996).

Wilayah Danau Toba sebagai pusat kepariwisataan di Sumatera Utara, dengan daya tarik utamanya adalah panorama hamparan perairan, menjadikan danau ini sebagai objek wisata danau terbesar di Indonesia. Dalam Rencana Induk Pengembangan Pariwisata Nasional (RIPNAS), kawasan Danau Toba menjadi salah satu andalan dan potensi asset pariwisata (Ardika, 1999). Kegiatan lain yang telah berkembang di perairan ini adalah KJA, yang pertama kali dicoba pada tahun 1988 (Dharma, 1988). Tingkat produksi total ikan dari KJA di perairan Danau Toba pada tahun 2010 tercatat mencapai 47.478 ton, yang cukup dominan adalah dari wilayah Kabupaten Samosir (24.420 ton), Kabupaten Toba Samosir (10.372 ton) dan dari Kabupaten Simalungun (9.807 ton) (Anonim, 2011).

Pengembangan KJA akan bernilai positif selama dalam batas kapasitas daya dukung (DD) perairan. Peningkatan KJA yang berlebihan akan menimbulkan dampak yang buruk pada masa yang akan datang. Kebijakan pemanfaatan perairan Danau Toba untuk pengembangan budidaya ikan dengan KJA harus memperhatikan kapasitas DD-nya dengan penetapan lokasi dan luasan yang tidak mengancam kegiatan yang telah ada yaitu aktivitas pariwisata.

Daya dukung situs perairan untuk pengembangan KJA merupakan suatu kriteria tingkat produksi maksimum yang dapat dicapai berdasarkan kadar total fosfor (TP; *Total Phosphor*) yang masih dapat diterima sesuai kepentingan pemanfaatan perairan tersebut (Beveridge, 1987). Kadar TP dipertimbangkan mengingat fosfor merupakan unsur penting yang dibutuhkan ikan untuk pertumbuhan, metabolisme, dan pembentukan fosfolipid (Jobling, 1995). Fosfor memasuki tubuh ikan melalui pakan. Namun demikian, terdapat beberapa bagian yang lepas ke perairan baik sebagai sisa pakan yang tidak termakan, sisa metabolit dan melalui feses (Rismeyer, 1998 *dalam* Azwar *et al.*, 2004).

Terkait komponen TP antara yang masuk dan keluar sebagaimana rumusan yang dikemukakan Vollenweider & Dillon, (1975) dalam Mason (1988), aktivitas KJA yang berlebih akan memicu akumulasi hara khususnya fosfor. Peningkatan hara di perairan pada akhirnya akan merubah status perairan dari perairan miskin hara (oligotrof) menjadi sangat subur (hipereutrof). Komponen fosfor di perairan akan berakumulasi, karena sifatnya tidak bersiklus lewat proses pertukaran gas sebagaimana yang terjadi pada nitrogen.

Telah dilakukan kajian daya dukung perairan Danau Toba untuk pengembangan budidaya ikan dengan KJA yang diharapkan dapat memberikan arahan pengembangan KJA yang optimal dan sejalan dengan aktivitas pariwisata.

BAHAN DAN METODE

Penentuan DD perairan Danau Toba untuk pengembangan KJA adalah mengacu pada estimasi beban total fosfor (TP) (Beveridge, 1987). Kajian ini didukung data sekunder, diantaranya kondisi fisik perairan (Lukman & Ridwansyah, 2010) dan data produksi ikan Danau Toba (Anonim, 2011).

Rumusan penentuan DD berdasarkan Beveridge (1987) adalah sebagai berikut:

Beban TP yang dapat diterima danau dari aktivitas budidaya ikan (L_{fish}), yaitu:

$$L_{fish} = \Delta P \cdot z \rho / (1 - R_{fish});$$

ΔP = Kapasitas perairan yang masih tersedia menerima TP dari aktivitas budidaya ikan intensif ($\mu\text{g/l}$)

z = kedalaman rata-rata danau

ρ = Laju penggelontoran (*flushing rate*) danau/tahun

$$\Delta P = [P]f - [P]i;$$

$[P]f$ = TP rata-rata yang dapat diterima perairan ($\mu\text{g/l}$)

$[P]i$ = TP awal ($\mu\text{g/l}$)

Rata-rata TP yang dapat diterima perairan danau ($[P]f$) mengacu pada tingkat kesuburan yang masih memungkinkan.

Secara keseluruhan, TP yang dapat diterima oleh perairan $[P]a$, yaitu:

$$[P]a = L_{fish} \times A;$$

A = luas perairan

Beban TP aktivitas KJA dihitung berdasarkan laju lepasannya dari proses budidaya ikan (Rismeyer, 1998 dalam Azwar *et al.*, 2004), dengan memperhatikan kadar TP pada pakan (Garno & Adibroto, 1999) dan faktor rasio konversi pakan (FCR; *Food conversion ratio*) dari tingkat produksi ikan di perairan Danau Toba.

Kadar TP dari aktivitas budidaya ikan (R_{fish}), dihitung menggunakan rumusan:

$$R_{fish} = x + [(1-x)R];$$

x = Proporsi TP tertahan pada sedimen (0,45-0,55 \approx 0,5; Beveridge, 1987)

R = Proporsi TP terlarut hilang ke sedimen

Proporsi TP terlarut yang hilang ke sedimen (R) dihitung menggunakan rumusan Larsen & Marcier (1976) dalam Beveridge (1987):

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

ρ = Laju penggelontoran danau/tahun

HASIL DAN PEMBAHASAN

Status Trofik Perairan Danau Toba

Mengacu pada kriteria Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 28/2009 (Tabel 1), dari kadar TP dan kadar fosfor-fosfat yang terukur status trofik perairan Danau Toba pada tahun 2010 sudah menunjukkan kondisi mesotrofik, eutrofik bahkan hipereutrofik. Kondisi perairan danau yang oligotrof hanya tercatat pada tahun 1929 (Ruttner, 1930), dan sejak tahun 1979 statusnya sudah mesotrofik (Soerjani *et al.*, 1979) (Tabel 2).

Tabel 1. Kriteria status trofik perairan danau berdasarkan beberapa parameter kualitas air

Status Trofik	Kadar rata-rata Total N (mg/l)	Kadar rata-rata Total P (mg/l)	Kadar rata-rata Chlorofil (mg/l)	Kecerahan rata-rata (m)	Kisaran kadar TP (mg/m ³)*
Oligotrof	≤ 0,650	< 0,010	< 0,002	≥ 10	3,0 – 17,7
Mesotrof	≤ 0,750	< 0,030	< 0,005	≥ 4	10,9 – 95,6
Eutrof	≤ 1,900	< 0,100	< 0,015	≥ 2,5	16,2 - 386
Hipereutrof	≥ 1,900	≥ 0,100	≥ 0,200	≤ 2,5	750 – 1.200

Sumber: Peraturan Menteri LH No. 28/2009 dalam Anonim (2009)

*) Vollenweider & Kerekes (1980)

Tabel 2. Status trofik Perairan Danau Toba berdasarkan kriteria fosfor.

Tahun	Parameter	Nilai Kisaran (Rataan) (mg/l)	Status Trofik	Sumber
1929	Fosfor-fosfat (PO ₄ -P)	0,005	Oligotrofik	Ruttner (1930)
1979	Fosfor-fosfat (PO ₄ -P)	0,03 – 0,07	Mesotrofik	Soerjani <i>et al</i> (1979)
1985	Total Fosfat (TP)	0,32 – 0,66	Hipereutrofik	ILEC & UNEF (1989)
2005	Total Fosfat (TP)	0,29 – 0,68 (0,547)	Hipereutrofik	Poernomo <i>et al</i> (2005)
2009	Total Fosfat (TP)	0,005 - 0,116 (0,025)	Oligo-hipereutrofik (mesotrofik)	Sulung & Lukman (2011)
2010	Total Fosfat (TP)*	0,013-0,399 (0,089)	Eutro-hipereutrofik (Eutrofik)	Lukman <i>et al</i> (2010)

*) wilayah tepian

Pada pengamatan 2005 oleh Poernomo *et al.*, (2005), kadar TP perairan Danau Toba berada pada kisaran > 0,1 mg/l yang mencirikan kondisi hipereutrofik. Pada pengamatan tahun 2009 (Sulung & Lukman, 2011), dari 12 lokasi yang tersebar hingga wilayah tengah perairan, tingkat kesuburan Danau Toba berkisar antara oligotrof hingga hipereutrof, dan secara umum menunjukkan kondisi mesotrofik. Sedangkan pada pengamatan bulan Maret 2010, di wilayah tepian Danau Toba berada pada kisaran eutrofik hingga hipereutrofik (Lukman *et al.*, 2010).

Terdapat keragaman status trofik antar wilayah Danau Toba, yang tampaknya terkait dengan aktivitas yang berbeda di setiap wilayah (Sulung & Lukman, 2011), namun tampak bahwa tingkat kesuburan perairan terus bertambah sejalan dengan waktu (Tabel 2).

Parameter Fisik Perairan penentu Daya Dukung dan Beban Fosfor

Berdasarkan ciri-ciri fisiknya menunjukkan laju penggelontoran Danau Toba mencapai 0,0123/tahun (Tabel 3). Laju penggelontoran ini terkait dengan volume danau yang cukup besar dibanding debit air yang keluar danau. Satu hal yang jelas, waktu tinggal air Danau Toba (81 tahun) (Lukman & Ridwansyah, 2010), jauh di atas waktu tinggal air beberapa danau lain seperti Danau Poso (7,2 tahun) (Lukman & Ridwansyah, 2009), dan Danau Maninjau (25 tahun) (Fakhrudin *et al.*, 2002).

Waktu tinggal air (RT; *Retention time*) sangat menentukan DD perairan untuk pengembangan KJA berbasis TP, karena mempengaruhi laju lepasan TP ke luar perairan danau. Dengan demikian, faktor utama dalam menentukan DD adalah RT yang didalamnya tergantung pada volume (V) dan debit air yang keluar (Q).

Tabel 3. Parameter Fisik Danau Toba untuk Perhitungan Daya Dukung KJA

No.	Parameter	Rumus/Sumber	Nilai
1.	Luas (A)	(m ²) Peta bathimetri	1.124.000.000
2.	Volume (V)	(m ³) Peta bathimetri	256.200.000.000
3.	Kedalaman rata-rata (z)	(m) V/L	227,936
4.	Debit outflow rata-rata* (q)	(m ³ /dt)	100
	(Q) (m ³ /tahun)		3.153.600.000
5.	Laju penggelontoran/tahun	(ρ) Q/V	0,0123
6.	Waktu tinggal air (RT)	(tahun) V/Q	81,24

Sumber: Lukman & Ridwansyah (2010);

*) Sastromijoyo (1990)

Tingkat produksi ikan pada tahun 2010 dari aktivitas KJA di perairan Danau Toba mencapai 47.477,9 ton, yang terutama didominasi oleh ikan nila. Kabupaten Samosir memiliki produksi ikan tertinggi, diikuti Kabupaten Toba Samosir dan Kabupaten Simalungun (Tabel 4). Produksi ikan dari Samosir dan Toba Samosir terutama dipasok dari aktivitas KJA perusahaan Penanaman Modal Asing (PMA) yang berlokasi di sisi timur Pulau Samosir. Produksi ikan dari Kabupaten Simalungun, sebagian bersumber dari aktivitas KJA PMA dan sebagian bersumber dari KJA masyarakat yang berpusat di Haranggaol. Sedangkan produksi dari kabupaten lainnya bersumber dari aktivitas KJA masyarakat.

Berdasarkan estimasi jumlah pakan yang digunakan untuk KJA di seluruh perairan Danau Toba, maka kadar fosfat yang dilepaskan lewat feses adalah 150,2 ton/tahun, sedangkan kadar P yang

dilepaskan dalam bentuk terlarut sebagai sisa metabolit mencapai 295 ton/tahun, sehingga kadar P total yang lepas ke perairan mencapai 445,6 ton/tahun (Tabel 5). Lepas TP ini relatif tinggi jika dibanding muatan dari sungai-sungai yang memasuki perairan Danau Toba dalam setahun, yang mencapai 88 ton/tahun (Lukman *et al.*, 2010).

Perhitungan DD untuk pengembangan KJA di Danau Toba mengikuti beberapa skenario, mengingat kondisi perairan Danau Toba saat ini berada pada tingkat kesuburan di atas oligotrofik (Tabel 1), sementara data-data TP pada periode pra pengembangan KJA di Danau Toba yang tersedia hanya data fosfor fosfat tahun 1929 (0,005 mg/l; Ruttner, 1930).

Skenario I adalah menetapkan TP rata-rata yang dapat diterima Danau Toba [P]_f pada kondisi oligotrofik (< 10µg/l ≈ 10µg/l), skenario II menetapkan [P]_f pada

Tabel 4. Data Produksi Ikan dari KJA di perairan Danau Toba Tahun 2010

Kabupaten	Nila (ton)	Mas (ton)	Total (ton)
Samosir	24.110,3	309,7	24.420,0
Toba Samosir	9.894,7	477,5	10.372,2
Simalungun	9.017,5	789,2	9.806,7
Karo	1.176,5	392,2	1.568,6
Hbg. Hasundutan	1.092,8	52,5	1.145,3
Dairi	62,6*	2,1**	84,7
Tapanuli Utara	59,5	16,3	75,8
Total	45.437,0	2.040,9	47.477,9

Sumber: Anonim (2011); *) termasuk produksi ikan mujaer

***) termasuk produksi ikan lele

Tabel 5. Prediksi pasokan P dari aktivitas KJA di wilayah perairan Danau Toba

Jenis ikan	Produksi total (ton) ¹⁾	Estimasi pakan yang digunakan ²⁾	Kadar P pada pakan (ton) ³⁾	Kadar P diretensi ikan (ton) ⁴⁾	Kadar P dibuang lewat feses (ton) ⁴⁾	Kadar P terbuang dalam bentuk terlarut (ton) ⁴⁾	Kadar P total yang terlepas ke perairan (ton)
Nilai	45.437,0	55.887,5 ^{a)}	670,65 ^{c)}	252,84 ^{d)}	140,84 ^{e)}	276,98 ^{f)}	417,80
Mas	2.040,9	3.714,4 ^{b)}	44,57 ^{c)}	16,80 ^{d)}	9,36 ^{e)}	18,41 ^{f)}	27,80
Total	47.477,9	59.601,9	715,22	269,64	150,20	295,39	445,60

Sumber: 1) Anonim (2011); 2) Lukman *et al.*, 2010; 3) Garno & Adibroto (1999);

4) Rismeyer, (1998) dalam Azwar *et al.*, (2004)

a) FCR nila = 1,23; b) FCR mas = 1,82; c) 1,2% dari berat pakan; d) 37,7 % dari kadar P pada pakan; e) 21,0% dari kadar P pada pakan; f) 41,3% dari kadar P pada pakan

kondisi oligo-mesotrofik (20 µg/l), dan skenario III menetapkan [P]f pada rata-rata pengukuran 2009 ($< 24,8\mu\text{g/l} \approx 25\ 0\mu\text{g/l}$) (Sulung & Lukman, 2011). Nilai [P]f oligotrofik dan mesotrofik ini mengacu pada Peraturan Pemerintah (PP) nomor 28 tahun 2009 (Tabel 1). Sementara itu penetapan nilai [P]f untuk kepentingan untuk rekreasi/olah raga air (0,005 mg/l) dan kebutuhan air minum (0,002 mg/l) (Beveridge, 1987) adalah sangat sulit tercapai, mengingat pemanfaatan wilayah perairan dan daratan Danau Toba sudah sangat tinggi.

Kadar TP yang dapat diterima perairan Danau Toba berdasarkan skenario I, II dan III, masing-masing adalah 324,4 ton/tahun, 973,3 ton/tahun, dan 1.297,8 ton/tahun, dengan tingkat produksi ikan yang dapat dicapai masing-masing 35.282 ton, 101.933 ton, dan 141.130 ton (Tabel 6).

Mengacu pada skenario I, tingkat produksi ikan tahun 2010 sudah melebihi perkiraan produksi ikan yang dapat dicapai. Dengan demikian, untuk mengembalikan kondisi perairan Danau Toba menjadi kondisi semula sebagai perairan yang oligotrofik, maka tingkat produksi harus dikurangi sebanyak 12.909 ton/tahun.

Jika akan mengacu pada skenario II dan III, harus dilakukan secara seksama mengingat kondisi perairan Danau Toba saat

ini pada kenyataannya sudah pada kondisi mesotrofik dan beberapa wilayah tepian bahkan sudah pada kondisi eutrofik. Pada sisi lain pemanfaatan perairan Danau Toba untuk tujuan wisata akan menjadi faktor pembatas pengembangan KJA hingga pada tingkat maksimal, karena perairan untuk aktivitas wisata membutuhkan kualitas air yang cukup tinggi.

Tingkat pembebanan unsur hara di perairan Danau Toba pada saat ini tidak hanya bersumber dari aktivitas KJA, tetapi juga dari aktivitas pemukiman dan pertanian yang juga telah cukup berkembang. Berdasarkan pengamatan Sulung & Lukman (2011), Sungai Naborsahan yang melintasi wilayah Parapat di kawasan Danau Toba ini pada pengukuran bulan Oktober 2009 mencapai 0,139 mg/l, dan memiliki kadar tertinggi dibanding sungai-sungai lain yang menjadi inlet Danau Toba.

KESIMPULAN

Daya dukung perairan Danau Toba untuk pengembangan KJA yang aman untuk aktivitas pariwisata adalah mengacu pada kondisi oligotrofik, yaitu skenario I dengan produksi 35 ribu ton/tahun atau bahkan di bawahnya. Produksi ikan perairan Danau Toba pada saat ini telah melebihi daya dukung tersebut.

Tabel 6. Penetapan daya dukung perairan Danau Toba untuk pengembangan KJA dengan beberapa skenario TP rata-rata yang dapat diterima Danau Toba.

No.	Parameter	Skenario I	Skenario II	Skenario III
1.	Proporsi TP terlarut yang hilang ke sedimen (R)	0.903	0.903	0.903
2.	TP tertahan permanen pada sedimen (x)	≈ 0,5	≈ 0,5	≈ 0,5
3.	TP yang berasal dari ikan yang diperlihara (R_{fish})	0.9514	0.9514	0.9514
4.	TP pada kondisi awal Danau Toba [P]i *	< 5 $\mu\text{g/l}$ (≈ 5 $\mu\text{g/l}$)	< 5 $\mu\text{g/l}$ (≈ 5 $\mu\text{g/l}$)	< 5 $\mu\text{g/l}$ (≈ 5 $\mu\text{g/l}$)
6.	TP rata-rata yang dapat diterima Danau Toba [P]f	<10 $\mu\text{g/l}$ (≈ 10 $\mu\text{g/l}$)	<20 $\mu\text{g/l}$ (≈ 20 $\mu\text{g/l}$)	24,8 $\mu\text{g/l}$ (≈ 25 $\mu\text{g/l}$)
7.	Kapasitas TP Danau Toba yang masih tersedia untuk budidaya ikan intensif ($\Delta P = [P]f - [P]i$)	≈ 5 $\mu\text{g/l}$	≈ 15 ($\mu\text{g/l}$)	≈ 20 ($\mu\text{g/l}$)
8.	Beban TP yang dapat diterima dari aktivitas budidaya ikan (L_{fish})	288,6 $\mu\text{g/m}^3/\text{th}$ 0,289 $\text{mg/m}^3/\text{th}$	865,9 $\mu\text{g/m}^3/\text{th}$ 0,866 $\text{mg/m}^3/\text{th}$	1.154,6 $\mu\text{g/m}^3/\text{th}$ 0.856 $\text{mg/m}^3/\text{th}$
9.	TP total yang dapat diterima Danau Toba ($[P]a = L_{fish} \times A$)	324,44 (ton/tahun)	973,32 (ton/tahun)	1.297,76 (ton/tahun)
10.	Estimasi produksi ikan yang dapat dicapai**	35.282 (ton/tahun)	101.932,7 (ton/tahun)	141.130,21 (ton/tahun)
11.	Produksi ikan yang masih dapat dicapai***	-12.195,3 (ton/tahun)	54.454,8 (ton/tahun)	93.652,3 (ton/tahun)

Keterangan: Skenario I : [P]f pada kondisi oligotrofik;

Skenario II : [P]f pada kondisi oligo-mesotrofik

Skenario III : [P]f pada kondisi TP rata-rata pengukuran 2009

*) Data fosfor tahun 1929 (Ruttner, 1930)

***) Nilai [P]a yang dikonversi kepada produksi ikan mengacu pada tabel 5

****) Berdasarkan tingkat produksi yang sudah dicapai tahun 2010 (tabel 5)

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2009. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 29 Tahun 2009, tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau dan/atau Waduk. Kementerian Negara Lingkungan Hidup. 22 hal.
- Anonim, 2011. Statistik Perikanan Budidaya Provinsi Sumatera Utara Tahun 2010. Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Sumatera Utara. 148 hal.
- Ardika, G., 1999. Danau dan Waduk dalam Pengembangan Pariwisata Berkelanjutan. Prosiding Semiloka Nasional Pengelolaan dan Pemanfaatan Danau dan Waduk. PPLH-IPB, Ditjen Bangda-Depdagri, Ditjen Pengairan-PU, dan Kantor Men. LH. Bogor. Hal. IV (1– 13).
- Arifin, S., 2004. Pengelolaan Ekosistem Kawasan Danau Toba yang Berwawasan Lingkungan. Prosiding Lokakarya Danau II. Pengelolaan Danau Berwawasan Lingkungan di Indonesia. Forum Danau Indonesia (FDI) dan International Lake Environment Committee Foundation (ILEC). Hal. 89 – 95.
- Azwar, Z.I., N. Suhenda, & O. Praseno. 2004. Manajemen Pakan pada Usaha Budi Daya Ikan dalam Karamba Jaring Apung. *Dalam*: Sudradjat, A.,

- S.E. Wardoyo, Z.I. Azwar, H. Supriyadi, & B. Priono (Penyunting). Pengembangan Budi Daya Perikanan di Perairan Waduk. Pusat Riset Perikanan Budidaya, BRKP, DKP. Hal.37 – 44.
- Beveridge, M.C.M. 1987. Cage Aquaculture. Fishing News Books, Ltd. Farnham-Survey-England, 352 p.
- Danakusumah, E & H. Herawan. 2000. Kematian Masal Ikan Budidaya di Perairan Waduk dan Kemungkinan Penanggulangannya. Prosiding Semiloka Nasional Pengelolaan dan Pemanfaatan Danau dan Waduk. Universitas Padjadjaran. I: 306 -314.
- Dharma, L. 1988. Percobaan Pemeliharaan Ikan Mas dalam Jaring Terapung di Ambarita-Danau Toba, Sumatera Utara. Bull. Penel. Perik. Darat, Vol. 7(2): 32 – 40.
- Fakhrudin, M., H. Wibowo, L. Subehi, dan I. Ridwansyah 2002. Karakterisasi Hidrologi Danau Maninjau Sumatera Barat. Prosiding Seminar Nasional Limnologi 2002. Pusat Penelitian Limnologi – LIPI, 65 – 75.
- Garno, Y. S dan T. A. Adibroto, 1999. Dampak Penggemukan Ikan di Badan Air Waduk Multiguna pada Kualitas Air dan Potensi Waduk. Prosiding Semiloka Nasional Pengelolaan dan Pemanfaatan Danau dan Waduk. IPB- Ditjen Pengairan - Men KLH. XVII: 1-10.
- Garno, Y. S. 2002. Beban Pencemaran Limbah Perikanan Budiaya dan Yutrofikasi di Perairan Waduk pada DAS Citarum. Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol. 3(2): 112 – 120.
- Lukman, 1996. Neraca Oksigen di Lokasi Jaring Apung Wilayah Bongas, Waduk Saguling. Prosiding Ekspose Hasil Penelitian Puslitbang Limnologi – LIPI Tahun 1995/1996. Puslit Limnologi-LIPI. Hal. 47 - 60
- Lukman & Hidayat, 2002. Beban dan Distribusi Bahan Organik di Waduk Cirata, Jurnal Teknologi Lingkungan 3 (2): 129 – 135.
- Lukman & I. Ridwansyah, 2009. Telaah Kondisi Fisik Danau Poso dan Prediksi Ciri Ekosistem Peraiannya. Limnotek, Perairan Darat Tropis di Indonesia.16 (2): 64 - 73.
- Lukman & I. Ridwansyah, 2010. Kajian Morfometri dan beberapa Paramaeter Stratifikasi Perairan Danau Toba. Limnotek, Perairan Darat Tropis di Indonesia.17 (2).
- Lukman, M. Badjoeri, Y. Syawal, & H.A. Rustini, 2009. Antisipasi Bencana Lingkungan Perairan Danau Toba melalui Penetapan Dayadukung dan Pemintakatan Wilayah Budidaya. Laporan Akhir Tahun 2009 Kegiatan Program Kompetitif – LIPI. Puslit Limnologi – LIPI. 79 hal.
- Lukman, M. Badjoeri, & S.H. Nasution, 2010. Antisipasi Bencana Lingkungan Perairan Danau Toba melalui Penetapan Dayadukung dan Pemintakatan Wilayah Budidaya. Laporan Akhir Tahun 2010 Kegiatan Program Kompetitif – LIPI. Puslit Limnologi – LIPI. 70 hal.
- Mason, C. F., 1988. Biology of Freshwater Pollution. Longman Scientific & Technical. Singapore. 250 p.
- Sulastri, 2002. Komposisi, Kelimpahan dan Distribusi Fitoplankton sebagai Dasar Analisis Kondisi Pencemaran Danau Maninjau, Sumatera Barat. Prosiding Seminar Nasional Limnologi 2002. Puslit Limnologi – LIPI. Hal. 255-271.
- Vollenweider, R.A & J. Kerekes. 1980. The Loading Concept as Basis for Controlling Eutrophication Phylosophy and Preliminary Result of the OECD Programme on Eutrophication. Eutrophication of Deep Lakes. Proceedings of a Seminar held in Gjovic, Norway, June 1978. Pergamon Press, Oxford, New York. p. 5 – 38.