

## **PERTIMBANGAN CIRI HIDROLOGI DAN MORFOMETRI DALAM PENENTUAN DAYA DUKUNG PERAIRAN DANAU TOBA UNTUK BUDIDAYA PERIKANAN**

**Lukman**

*Pusat Penelitian Limnologi – LIPI*

*E-mail : luman\_limnol@yahoo.com*

### **ABSTRAK**

*Daya dukung suatu perairan terhadap beban masukan ditentukan oleh waktu tinggal massa air (retention time) di dalamnya, sedangkan waktu tinggal air ditentukan oleh pasokan air dari daerah tangkapan air (DTA) dan volume perairannya (V). Danau Toba memiliki cekungan yang secara fisik dipisahkan oleh keberadaan Pulau Samosir, yaitu bagian cekung utara dan cekung selatan dengan karakteristik morfometri yang berbeda. Luas (L) dan volume (V) Danau Toba masing-masing adalah 1107,65 km<sup>2</sup> dan 256,19 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, cekung utara (A: 577,58 km<sup>2</sup>; V: 155,67 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>) dan cekung selatan (A: 529,96 km<sup>2</sup>; V: 100,52 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>), yang dibatasi oleh garis imajiner di sisi timur dari Parapat ke arah Samosir dan sisi timur di wilayah Pangururan. Sementara itu karakteristik hidrologi DTA dicirikan dengan sebaran sungai yang tidak merata, yaitu di cekung danau bagian selatan lebih tinggi dibanding bagian utara, dan outlet danau hanya melalui Sungai Asahan yang berada di cekung selatan dengan debit rata-rata 100 m<sup>3</sup>/dt. Sungai yang paling besar adalah S. Silang berada di cekung selatan danau dengan debit rata-rata 10.7 m<sup>3</sup>/dt, atau hampir 10% dari debit outlet danau. Dengan kondisi demikian, mengindikasikan bahwa cekung danau bagian selatan akan lebih dinamis dibanding cekung utara, massa tinggal air di cekung selatan akan lebih rendah, sehingga daya dukung perairan terhadap beban masukan akan lebih tinggi.*

**Kata kunci :** Danau Toba, morfometri, massa tinggal air, daya dukung

### **ABSTRACT**

*Carrying capacity of aquatic system on receiving material loading, especially nutrient, is determined by the water residence time (retention time). The residence time is determined by the supply of water from the catchment area (CA) and the volume of water body (V). Lake Toba is the lake which has multipurpose activity, one of them is cage system aquaculture (CSA). Area (A) and volume (V) of Lake Toba is 1107.65 km<sup>2</sup> and 256.19 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, respectively, and has a basin that is physically separated the north and south basin by the presence of Samosir Island. North basin (A: 577.58 km<sup>2</sup>; V: 155.67 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>) and south basin (A: 529.96 km<sup>2</sup>; V: 100.52 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>) are bordered by an imaginary line on the east side in Parapat toward to Samosir Island, and to west region of lake in Pangururan. Meanwhile, the hydrological condition in the catchment is characterized by an uneven distribution of rivers as inlets of Lake Toba. The inlet discharge in south basin of the lake is higher than that in the north, and the outlet of the lake is only through Asahan River in southern basin with mean discharge 100 m<sup>3</sup>/sec. River Silang is the largest river as one inlet of Toba Lake, located in south basin, it showed mean discharge 10.7 m<sup>3</sup>/sec., nearly 10% of the outlet discharge. Under these conditions, it indicates that the southern part of the lake will be more dynamic than that of the northern part, water retention time in south basin will be lower, so that the carrying capacity of basin to receive the nutrient material will be higher. The consequence from that situation, for north basin, is that it has to be more careful on management point and the development of CSA has to be more limited.*

**Key words:** Lake Toba, hydrology, morphometry, retention time, carrying capacity

## PENDAHULUAN

Daya dukung (*carrying capacity*) merupakan pencapaian produksi pada level maksimum dari suatu sumberdaya yang diharapkan dapat bertahan secara berkelanjutan (Beveridge, 1987). Pemahaman daya dukung tersebut merupakan suatu tinjauan produksi, sedangkan pada satu sisi lain daya dukung dari pendekatan alami suatu ekosistem adalah berapa besar suatu perairan mampu mendukung produksi biota yang ada di dalamnya secara berkesinambungan. Setiap ekosistem perairan memiliki daya dukung yang beragam yang dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia yang dimilikinya.

Dalam kepentingan suatu proses budidaya perikanan di suatu perairan, khususnya pengembangan budidaya ikan di dalam karamba jaring apung (KJA) di ekosistem danau, daya dukung adalah suatu yang menjadi perhatian utama untuk menjamin optimalisasi dan kesinambungan produksinya. Terdapat dua hal yang menentukan daya dukungnya, yaitu: i) Daya dukung terhadap dampak penambahan hara dari proses budidaya yang tidak menimbulkan proses eutrofikasi dan penurunan kualitas air yang dapat mengganggu aktivitas lainnya; dan ii) Daya dukung terhadap tetap tersedianya cadangan oksigen (*DO reservoir*) pada kolom hipolimnion (kolom perairan bagian bawah) dalam menerima dan mendegradasi limbah organik dari sisa pakan dan feses. Perhatian pertama adalah terkait dengan kepentingan lain di perairan danau yang membutuhkan kualitas air yang tinggi, sementara faktor kedua adalah yang akan menentukan ketersediaan oksigen terlarut di wilayah KJA yang masih layak bagi kehidupan ikan yang dipelihara.

Faktor daya dukung terutama akan sangat ditentukan oleh karakteristik fisik lingkungan perairan (hidromorfologi dan regim air), yang sangat spesifik untuk setiap danau. Daya dukung perairan yang telah dikembangkan oleh Vollenweider (1975), berdasarkan hubungan input-output hara, terutama terhadap N (nitrogen) dan P (Phosphor). Vollenweider telah menghubungkan laju beban (pasokan tahunan hara per satuan luas danau) terhadap kedalaman rata-rata dan menghasilkan nilai muatan hara (N dan P) yang diizinkan berdasarkan tingkat kedalaman rata-rata danau. Sebagaimana diketahui, kadar *total phosphor* (TP) di suatu perairan sering ditetapkan sebagai salah satu kriteria tingkat kesuburannya, selain kadar *total*

*nitrogen* (TN), kadar klorofil-*a* dan kedalaman penampakan keping *Sechii* (Vollenweider & Kerekes, 1980).

Daya dukung tersebut adalah memperhatikan kadar ketersediaan fosfor di perairan dan pasokan fosfor dari luar. Pasokan fosfor total ke dalam danau berasal dari sumber alami yaitu dari daerah tangkapan (DTA) dan jatuhnya langsung yang terbawa air hujan, serta pasokan buatan (nir alami) dari aktivitas manusia seperti limbah dari KJA. Sementara itu kadar total (muatan) fosfor (P) di perairan, selain ditentukan oleh pasokan P dari luar, juga dipengaruhi oleh dimensi danau, laju pembilasan, dan fraksi P yang hilang secara permanen ke dasar perairan.

Perairan Danau Toba merupakan perairan yang memiliki peran multifungsi, dimana sebagian besarnya merupakan aset pariwisata. Pada sisi lain, usaha budidaya ikan sistem KJA yang juga saat ini berkembang di perairan Danau Toba, banyak menuai perhatian masyarakat, terkait kontroversi antara kebutuhan sosial ekonomi masyarakat dan kelestarian lingkungan, serta antara pencapaian produksi dan daya dukung perairan. Jumlah KJA yang telah beroperasi di Danau Toba pada tahun 1999 adalah 2.400 unit KJA (Arifin, 2004). Dua pemanfaatan yang sangat bertolakbelakang, menyangkut kebutuhan pariwisata perairan akan lingkungan yang baik terutama kualitas air misalnya ditinjau dari aspek tingkat kejernihan (transparansi) yang cukup tinggi. Di wilayah beriklim sedang, pengelolaan perairan danau akan sangat memperhatikan tingkat kecerahan perairan minimum di musim panas yang merupakan gambaran kadar klorofil *a* yang ada di dalam kolom air.

Dengan demikian, daya dukung perairan dalam pengembangan KJA, sebagai kasus perairan Danau Toba, akan ditentukan oleh karakteristik hidrologis dan morfometrinya.

## **KARAKTERISTIK HIDROLOGI**

Danau Toba merupakan danau tipe vulkanik, terletak di Provinsi Sumatera Utara yang berada pada ketinggian sekitar 904 m dpl, membentang dari barat laut ke tenggara sepanjang 87 km dan lebar 27 km dengan kedalaman maksimum sekitar 505 m. Luasan daerah tangkapan air (DTA) Danau Toba sekitar 3.658 km<sup>2</sup> (365.800 ha) dan luasan perairan danau 1.103 km<sup>2</sup> (Nishimura *et al.* 1994; Hehanusa 2000). Sementara itu menurut Lukman & Ridwansyah (2010), luas DTA

berdasarkan perhitungan *Automatic Watershed Delineation* (AWD) dengan menggunakan aplikasi hidrologi model SWAT adalah 2.486 km<sup>2</sup> (248.600 ha).

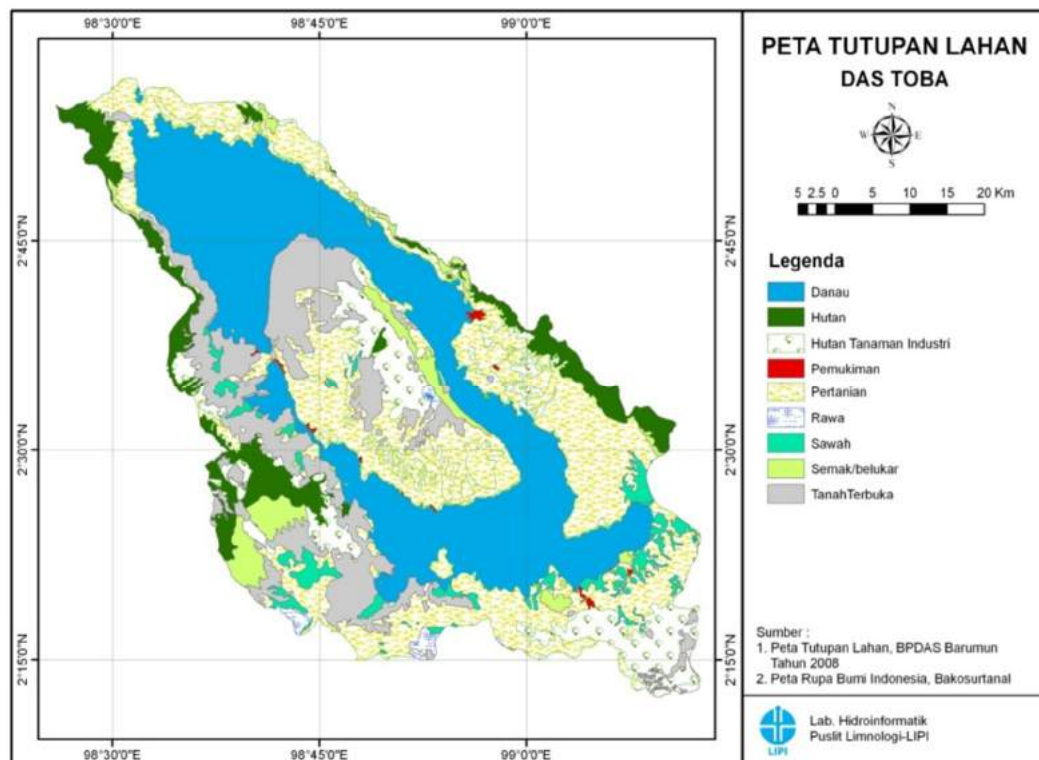
Komposisi tutupan lahan DTA Danau Toba dengan proporsi yang cukup tinggi adalah tanah terbuka (20,6%) dan pertanian lahan kering (27,6%) (Tabel 1). Sebagaimana diketahui tutupan lahan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas perairan danau.

Tabel 1. Komposisi tutupan lahan di DAS Toba

Tutupan Lahan	Luas (ha)	Persentase (%)
Hutan Dataran Rendah	171.8	0.1
Hutan Dataran Tinggi	25321.6	10.4
Hutan Tanaman Industri	31452.2	12.9
Pemukiman	876.3	0.4
Pertanian Lahan Kering	67496.4	27.6
Pertanian Lahan Kering bercampur semak	43018.2	17.6
Rawa	1940.2	0.8
Sawah	11247.9	4.6
Semak/belukar	12474.8	5.1
TanahTerbuka	50374.0	20.6
Jumlah	244373.5	100.0

Sumber: BP DAS Barumum, Departemen Kehutanan (2008)

Tanah terbuka banyak tersebar di wilayah Samosir, sisi barat dan barat daya DTA Toba, sedangkan pertanian lahan kering tersebar di Pulau Samosir bagian selatan, DTA Toba di wilayah utara, timur dan selatan. Aktivitas pertanian sawah tersebar di lembah-lembah sungai, terutama di DTA Toba wilayah barat, barat daya, selatan dan tenggara DTA (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Tutupan Lahan DAS Toba  
Sumber: BP DAS Barumum, Departemen Kehutanan (2008).

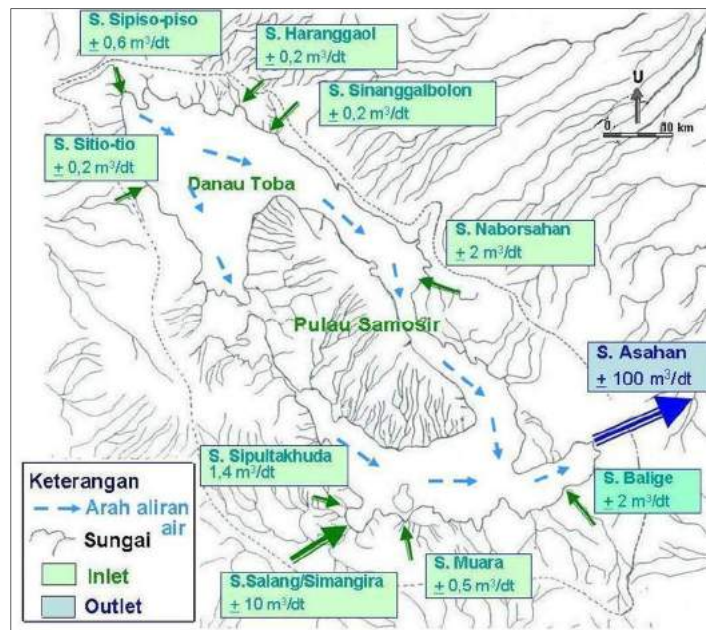
Pertanian lahan kering sebagian besar diusahakan pada tempat datar, sebagian kecil disela-sela bukit yang berlereng curam yang tanahnya masih subur. Pertanian sawah biasanya dijumpai pada daerah datar atau di sela-sela bukit yang dekat dengan sungai sebagai sumber air dan tampak sangat dominan di wilayah tenggara DTA, terutama sekitar Balige dan sekitar outlet Danau Toba.

Pola aliran sungai yang menjadi inlet danau membentuk pola regim aliran air yang spesifik untuk setiap danau, dan berperan terhadap pola dan dinamika bahan pencemar dari berbagai aktivitas pemanfaatan di wilayah danau. Menurut Sly (1978) wilayah tangkapan danau memiliki pengaruh besar terhadap pasokan material sedimen dan material lainnya.

Pola aliran air di Danau Toba didominasi oleh inlet berupa sungai-sungai kecil, dengan jumlah total 289 sungai namun hanya 71 sungai permanen dan sisanya bersifat musiman (*intermittent*). Dari Pulau Samosir mengalir 122 buah sungai dan dari daratan Sumatera 177 buah (Soedarsono, 1989). Sementara itu berdasarkan Meigh *et al* (1990) terdapat 295 aliran sungai yang mengalir ke Danau Toba,

sebagian besar diantaranya merupakan daerah tangkapan yang relatif kecil, rata-rata memiliki luas DTA 8,2 km<sup>2</sup>, dan hanya beberapa yang memiliki luas di atas 100 km<sup>2</sup>.

Berdasarkan pengamatan pada beberapa sungai utama di DTA Toba, sungai yang memiliki debit paling besar adalah Sungai Silang/Simangira ( $\pm 10$  m<sup>3</sup>/dt), sungai yang memiliki debit sedang adalah Naborsahan ( $\pm 2$  m<sup>3</sup>/dt), S. Balige ( $\pm 2$  m<sup>3</sup>/dt), dan Sipultakhuda ( $\pm 1,4$  m<sup>3</sup>/dt). Sungai-sungai tersebut umumnya berada di wilayah selatan danau, sementara outletnya sendiri yaitu Sungai Asahan juga berada di wilayah selatan danau (Gambar 2).



Gambar 2. Pola Regim Aliran Air di Danau Toba  
Sumber: Lukman & Ridwansyah (2010)

Menurut Meigh *et al* (1990), jumlah rata-rata aliran permukaan (*run of*) dari DTA Danau Toba mencapai 78,6 m<sup>3</sup>/dt, yang diantaranya akan mengalir melalui sungai-sungai di DTA tersebut. Sementara itu berdasarkan data debit Sungai Asahan (outlet Danau Toba) yang diamati di stasiun Siruar, maka data debit keluaran Danau Toba periode tahun 1920 – 1932 adalah 110,4 m<sup>3</sup>/dt, periode 1957 – 1975 adalah 104,4 m<sup>3</sup>/dt, dan periode 1976 -1988 mencapai 90 m<sup>3</sup>/dt (Sastromijoyo, 1990). Berdasarkan debit keluaran air danau yang terukur tersebut yang berkisar antara 90 m<sup>3</sup>/dt– 110 m<sup>3</sup>/dt, maka rata-rata debit keluaran Danau Toba akan berada pada 100 m<sup>3</sup>/dt. Dengan demikian terdapat pasokan air ke Danau Toba diluar dari aliran permukaan tersebut  $\pm 20$  m<sup>3</sup>/dt.

Sebaran sungai-sungai besar umumnya berada di cekung selatan Danau Toba, hal ini tampak terkait dengan DTA di bagian utara yang relatif lebih sempit dibandingkan dengan DTA bagian selatan. Berdasarkan kondisi tersebut diperkirakan pasokan air dari DTA wilayah selatan akan lebih tinggi dibandingkan DTA di utara.

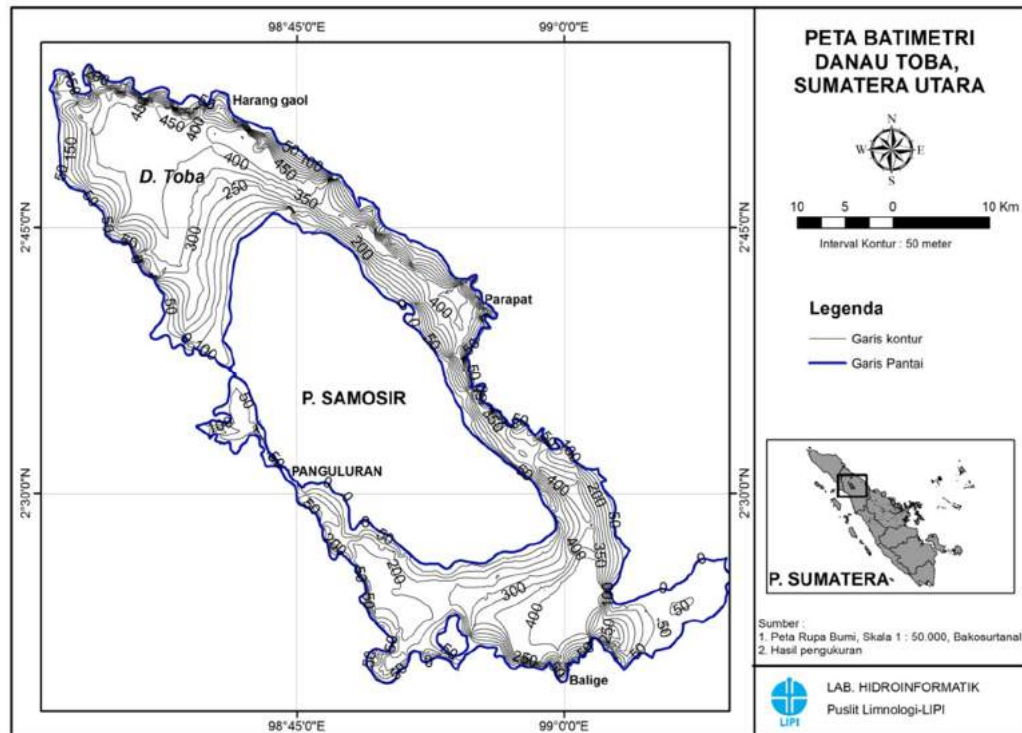
### KARAKTERISTIK MORFOMETRI

Kondisi fisik Danau Toba yang memiliki Pulau Samosir di tengahnya menciptakan dua cekung utama perairan, yaitu cekung utara dan cekung selatan. Berdasarkan perhitungan dari pengukuran batimetri dan deliniasi citra landsat memberikan karakteristik morfometri Danau Toba, diantaranya luas permukaan,  $1.124 \text{ km}^2$  (112.400 ha) volume danau sekitar  $256,2 \text{ km}^3$  ( $256,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ ) dengan kedalaman maksimum 508 m (Tabel 2; Gambar 3).

Tabel 2. Karakteristik morfometri Danau Toba

No	Parameter	Dimensi	Sumber
1.	Luas permukaan ( $\text{km}^2$ )	1.124	Citra Landsat
2.	Kedalaman maksimum (m)	508	Peta batimetrik
3.	Volume ( $\times 10^9 \text{ m}^3$ )	256,2	Peta batimetrik
4.	Kedalaman rata-rata (m)	228	Peta batimetrik
5.	Luas DTA ( $\text{km}^2$ )	2.486	Citra Landsat
6.	Rasio luasDTA/luas permukaan danau	2,21	Perhitungan

Sumber: Lukman & Ridwansyah (2010)



Gambar 3. Peta batimetri Danau Toba berdasarkan kontur kedalaman  
(Sumber: Lukman & Ridwansyah, 2010)

Dengan volume Danau Toba yang mencapai  $256,2 \times 10^9 \text{ m}^3$  (Tabel 1), maka Danau Toba akan memiliki waktu tinggal (*retention time*) air 81,24 tahun. Masa simpan air Danau Toba ini cukup panjang, dibandingkan waktu tinggal air Danau Poso yang hanya 7,21 tahun (Lukman & Ridwansyah, 2009).

Karakteristik morfometrik Danau Toba yang membentuk dua cekungan besar, utara dan selatan, dan dipisahkan oleh adanya Pulau Samosir, ternyata menunjukkan cekung utara relatif lebih luas dibanding cekung selatan, demikian pula volume air yang terakurpun lebih tinggi (Tabel 3).

Tabel 3. Perhitungan luasan dan volume cekungan utara dan selatan Danau Toba

Wilayah Cekungan	Luas ( $\text{km}^2$ )*	Proporsi Luas (%)	Volume ** ( $\times 10^9 \text{ m}^3$ )	Proporsi Volume (%)
Utara	586,16	52,15	155,67	60,8
Selatan	537,84	47,85	100,52	39,2
Total	1.124, 54	100	256,2	100

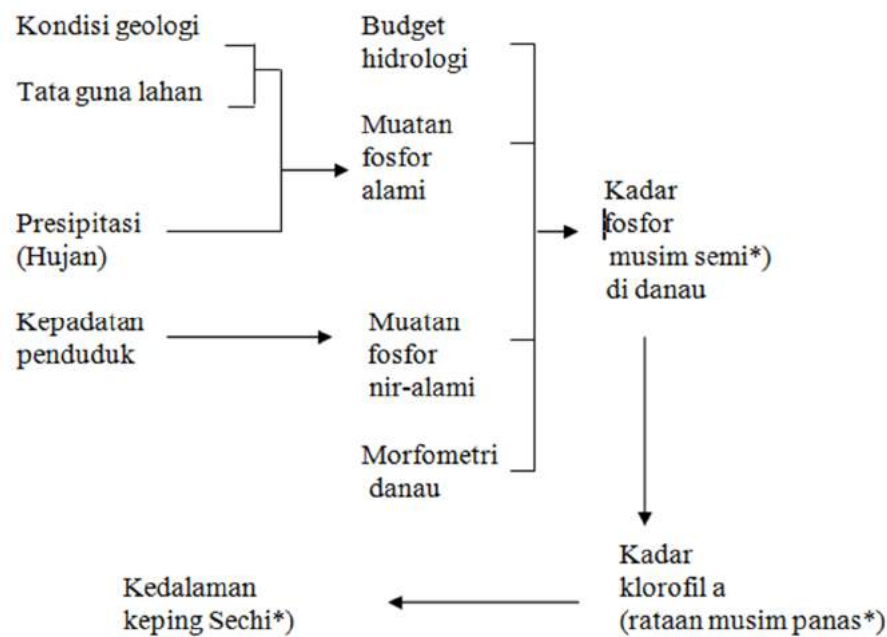
Sumber: Lukman & Ridwansyah (2010)



## PERHATIAN TERHADAP DAYADUKUNG DANAU

Mengacu pada formulasi dayadukung untuk kegiatan pengembangan KJA, diantaranya adalah mempertimbangkan kesetimbangan pasokan dan penghilangan *phosphor* (P) dari sistem perairan (Beveridge, 1996). Sebagaimana diketahui fosfor merupakan salah satu parameter penentu kesuburan perairan (Vollenweider & Kerekes, 1980). Berdasarkan pendekatan yang digunakan Dillon & Rigler (1975) pasokan *total phosphor* (TP) ke dalam perairan, akan terkait dengan kondisi DTA dan kondisi morfometri, serta ditunjang oleh tingkat kepadatan penduduk yang menghuninya. Tingkat kesuburan perairan sebagai dampak dari pasokan fosfor, akan tergambarkan dalam kadar klorofil *a*-nya (Gambar 4).

Mengacu pada rumusan Vollenweider (1975), sebagaimana dikemukakan sebelumnya, input-output P di perairan danau terkait kondisi morfometri, terutama kedalaman rata-rata (*z*) dan waktu tinggal air (*Retention time*). Pasokan fosfor alami ( $J_N$ ) ke dalam suatu perairan berasal dari daerah tangkapan ( $J_E$ ) dan dari jatuhnya langsung/presipitasi yang umumnya melalui air hujan ( $J_{PR}$ ). Sementara itu pasokan fosfor secara keseluruhan (total) ( $J_T$ ) ke perairan danau berasal dari aktivitas alami ( $J_N$ ) dan pasokan dari kegiatan manusia/*artificial* ( $J_A$ ). Waktu tinggal air memberikan pengaruh terhadap laju pembilasan (*flushing rate*) ( $\rho$ ) danau yang mana merupakan bagian debit aliran ( $Q$ ) air yang keluar di outlet terhadap volume danau ( $V$ ), atau  $Q/V$ , yang akan mempengaruhi laju sedimentasi ( $\sigma$ ) P di perairan danau. Menurut formulasi Larsen & Mercier (1976), laju sedimentasi ( $\sigma$ ) di perairan danau alami adalah:  $1 + 0,747\rho^{0,507}$ .



Gambar 4. Skema model empiris yang digunakan untuk mengakses pengaruh aktivitas manusia terhadap status trofik danau (Sumber: Dillon & Rigler, 1975).

Dengan demikian dayadukung perairan Danau Toba untuk pengembangan KJA, juga harus memperhatikan faktor-faktor hidrologi dan morfometrinya. Kondisi hidrologis Danau Toba yang dicirikan DTA di utara lebih sempit dan aliran sungai masuk dominan di selatan, sementara outletnya yaitu Sungai Asahan juga berada di selatan, tepatnya di sisi tenggara danau, maka pola sirkulasi air di cekung selatan cenderung akan lebih dinamis. Namun dengan kuantitas sungai di selatan juga lebih banyak, maka pasokan P dari DTA akan lebih tinggi yang mengalir melalui sungai-sungai tersebut.

Kondisi morfometri Danau Toba yang terpisah antara cekung utara dan selatan, dengan volume cekung utara jauh lebih besar (61% ) dibandingkan dengan selatan (39%) (Tabel 3), sementara pola aliran air masuk di selatan lebih tinggi maka akan menciptakan pola/waktu simpan air yang berbeda. Wilayah perairan Danau Toba bagian utara akan memiliki waktu simpan air yang jauh lebih panjang dibanding selatan, dan hal ini harus menjadi pertimbangan pemanfaatannya terkait dengan tingkat akumulasi pencemar yang berbeda.

## KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan pada kondisi hidrologi dan morfometri Danau Toba, perairan di cekung utara akan memiliki kondisi yang lebih rentan terhadap akumulasi hara khususnya komponen P terkait dengan tingkat waktu simpan air yang cenderung lebih panjang. Perbedaan dari pola sirkulasi massa air yang cenderung lebih tinggi di cekung selatan berimplikasi pada pola pengelolaan yang lebih berhati-hati untuk cekung utara.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, S., 2004. Pengelolaan Ekosistem Kawasan Danau Toba yang Berwawasan Lingkungan. Prosiding Lokakarya Danau Kedua Pengelolaan Danau Berwawasan Lingkungan di Indonesia. Forum Danau Indonesia (FDI) dan International Lake Environment Committee Foundation (ILEC). Hal. 89 – 95.
- Beveridge, M.C.M, 1987. Cage Aquaculture. Fishing News Books Ltd.England. 352p
- Dillon, P.J., & F.H. Rigler. 1975. A simple methods for predicting the capacity of a lake for development based on trophic status. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 32: 1519-1531
- Hehanussa, P.E. 2000. Lake Toba, a Multiple Caldera Depression, North Sumatera, Indonesia. Report of Suwa Hydrobiological Station, Shinshu University, Japan.
- Larsen , D.P & H.T. Mercier. 1976. Phosphorus retention capacity of lakes. *J. Fish. Res. Bd. Canada*. 33: 1742 - 1750
- Lukman & I. Ridwansyah. 2010. Kajian morfometri dan beberapa parameter stratifikasi perairan Danau Toba. *Limnotek*, Vol. XVII (2):
- Lukman & I. Ridwansyah. 2009. Telaah Kondisi Fisik Danau Poso dan Prediksi Ciri Ekosistem Perairannya. *Limnotek*, Vol. XVI (2): 64 – 73
- Meigh, J., M. Acreman, K. Sene & J. Purba. 1990. The wáter balance of Lake Toba. International Conference on Lake Toba, May 1990. Jakarta – Indonesia.
- Nishimura, S., E. Abe, J. Nishida, T. Yokoyama, A. Dharma, P.E. Hehanussa, and F. Hehuwat. 1984. Gravity and Volcanostratigraphic Interpretation of Lake Toba Region, North Sumatra, Indonesia. In: *Tectonophysics*. Elsevier Science: Amsterdam. p. 253 -272.
- Vollenweider, R.A. 1975. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.* 37: 53 - 84
- Vollenweider, R.A & J. Kerekes, 1980. The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary result of the OECD programme on eutrophication. *Prog. Wat. Tech.* Vol. 12 (2), Norway, pp. 5 -38. IAWPR/Pergamon Press Ltd. Great Britain.