

FRAKSINASI FOSFORUS PADA SEDIMENT DI BAGIAN LITORAL DANAU MATANO, SULAWESI SELATAN

Sulung Nomosatryo¹, Cinhya Henny¹, Eti Rohaeti², dan Irmanida Batubara²

¹Puslit Limnologi LIPI

²Departemen Kimia, Institut Pertanian Bogor

ABSTRAK

Senyawaan Fosforus di sedimen dapat berperan sebagai pemasok internal terhadap badan air danau itu sendiri. Salah satu analisis untuk mengetahui bentuk senyawa fosforus yang akan terlepas atau tetap terikat yaitu dengan melakukan analisis fraksinasi senyawaan fosforus. Tujuan penelitian ini yaitu mengkarakteristik fraksinasi fosforus di sedimen bagian litoral Danau Matano dan diharapkan sebagai bahan pertimbangan dalam menentukan kebijakan pengelolaan danau secara holistik. Sedimen diambil dilima lokasi Stasium pengambilan pada bagian litoral Danau Matano dengan sediment core dan membagi sedimen menjadi beberapa bagian dengan interval 5 cm. Penelitian dilakukan pada bulan Mei-November 2010. Fraksinasi Fosforus dilakukan dengan menganalisis ortofosfat yang terekstrak menjadi 4 fraksi yaitu Total Fosforus (TP), fraksi terekstrak dengan HCl 0,5 N (HCl-P), fraksi yang terekstrak dengan NaOH 0,1 M (NaOH-P) dan fraksi yang terekstrak dengan NH₄Cl 1M (NH₄Cl-P). Secara keseluruhan terlihat bahwa prosentase senyawaan fosforus anorganik lebih tinggi bila dibandingkan dengan senyawaan fosforus organik. Fraksinasi senyawaan fosforus anorganik lebih di dominasi oleh fraksi fosforus yang terikat dengan Fe atau Al (NaOH-P, 0,0147-0,1792 mg/g) dan yang terikat dengan Ca (HCl-P, 0,0098-0,1577 mg/g). Fraksi yang mencerminkan fosforus terjerap bebas (NH₄Cl-P) memiliki konsentrasi yang lebih rendah (<0,0001-0,0005 mg/g) bila dibandingkan dengan HCl-P dan NaOH-P. Peranan besi dalam mengikat senyawaan fosfor dikuatkan dengan adanya korelasi positif antara Besi dan fraksi NaOH-P ($p=0.666$). Hasil Fraksinasi fosfor ini menunjukkan bahwa sedimen bagian litoral danau Matano memiliki senyawaan fosfor yang tidak mudah untuk terlepas kedalam perairan, hal ini dikarenakan kecilnya fraksi NH₄Cl-P. Oleh karena itu, salah satu masukan yang perlu diwaspadai adalah yang berasal dari bagian eksternal badan air danau tersebut.

Kata Kunci: Danau Purba (Ancient Lake), Danau Oligotrofik, Bioavailabilitas Fosforus, Siklus Nutrien.

PENDAHULUAN

Senyawaan fosforus, khususnya ortofosfat (fosfat) adalah merupakan salah satu penyusun unsur hara yang sangat dibutuhkan dalam kehidupan perairan. Masukan senyawaan ini ke badan air dapat menyebabkan tingginya biomassa fitoplankton yang berhubungan erat dengan tingkat kesuburan suatu perairan (Goldman & Horne 1983). Fitoplankton dan tumbuhan air lainnya akan memanfaatkan fosfat dalam proses fotosintesis. Adanya pertumbuhan fitoplankton yang tinggi di badan air alami seperti di perairan danau menunjukkan terjadi proses eutrofikasi akibat adanya pengkayaan unsur hara kedalam danau tersebut. Eutrofikasi akan menyebabkan terjadi penurunan kualitas air di perairan danau tersebut.

Salah satu bentuk fosforus yang sangat penting adalah ion fosfat (PO₄³⁻). Ketersediaan fosfat di perairan alami sangat dipengaruhi oleh sifat fosfat yang mudah

terjerap dan terlepas oleh partikulat/sedimen. Siklus biogeokimia fosforus di antarmuka sedimen-air menjadi penting karena proses kesetimbangan penyanga ketersediaan fosfat akan terjadi. Bentuk anion fosfat ini mudah sekali mengalami imobilisasi oleh tanah dengan membentuk senyawaan yang tidak mudah larut (Canfield *et al.* 2005). Fosfat yang terikat dalam partikulat ini berada dalam bentuk sedimen dan sewaktu-waktu dapat dilepaskan kembali ke perairan dan dapat berperan dalam proses eutrofikasi di perairan bila kondisinya memungkinkan (Smith *et al.* 2006).

Bila perairan bersifat anaerobik, maka akan terjadi proses pelepasan fosfat yang terjerap menjadi fosfat terlarut melalui proses kimiawi dan biologis (Stumm & Morgan 1996). Tidak semua fraksi fosforus dapat dilepaskan dari sedimen ke air yang berada di atasnya. Fraksi fosforus dari suatu sedimen danau dapat dibagi menjadi sejumlah fraksi yaitu fosforus yang terjerap bebas (*Loosely adsorbed Phosphorus, Exch-P, NH₄Cl-P*), fosforus yang terikat dengan Al & Fe Oksida (*Fe/Al-P, NaOH-P*), fosforus anorganik (*Inorganic Phosphorus, IP*), dan fosforus Organik (*organic Phosphorus, OP*) (Canfield *et al.* 2005).

Danau Matano adalah danau yang unik dan sering disebut sebagai danau purba. Danau ini berada di pulau Sulawesi yang berada dalam garis Wallace maka peneliti lebih banyak berkonsentrasi pada organisme endemiknya yaitu fito dan zooplankton (Haffner *et al.* 2001, Sabo *et al.* 2008), protozoa (Fernandez-Leborans *et al.* 2006), *sponges* air tawar (Meixner *et al.* 2007), dan ikan *telmatherinidae* (Schwarzer *et al.* 2008). Crowe (2008) dan Katsev *et al.* (2010) ternyata melihat bahwa endemisitas organisme ini tidak terlepas dari kondisi kualitas air danau tersebut oleh karena itu mereka melakukan penelitian mengenai proses geokimia perairan di badan danau tersebut.

Dominansi laterit di sekitar daerah tangkapan danau, menyebabkan besi (hidroksida) oksida memegang peranan penting dalam proses geokimia di sistem danau (Crowe 2008). Senyawaan besi ini dapat menjerap senyawaan fosforus ketika kondisi badan air bersifat aerobik dan menyebabkan rendahnya konsentrasi fosfat di badan air Danau Matano. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui fraksinasi senyawaan fosforus yang terekam di sedimen yang dikaitkan dengan sifat fisikokimia sedimen dan kondisi lingkungan di perairan litoral danau. Informasi mengenai fraksinasi senyawaan fosforus di sedimen, diharapkan dapat dijadikan salah

satu masukan dalam menentukan kebijakan dalam mengelola Danau secara holistik. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi situs acuan (*reference site*) mengenai fraksi fosforus di sedimen yang mewakili danau yang bersifat oligotrofik.

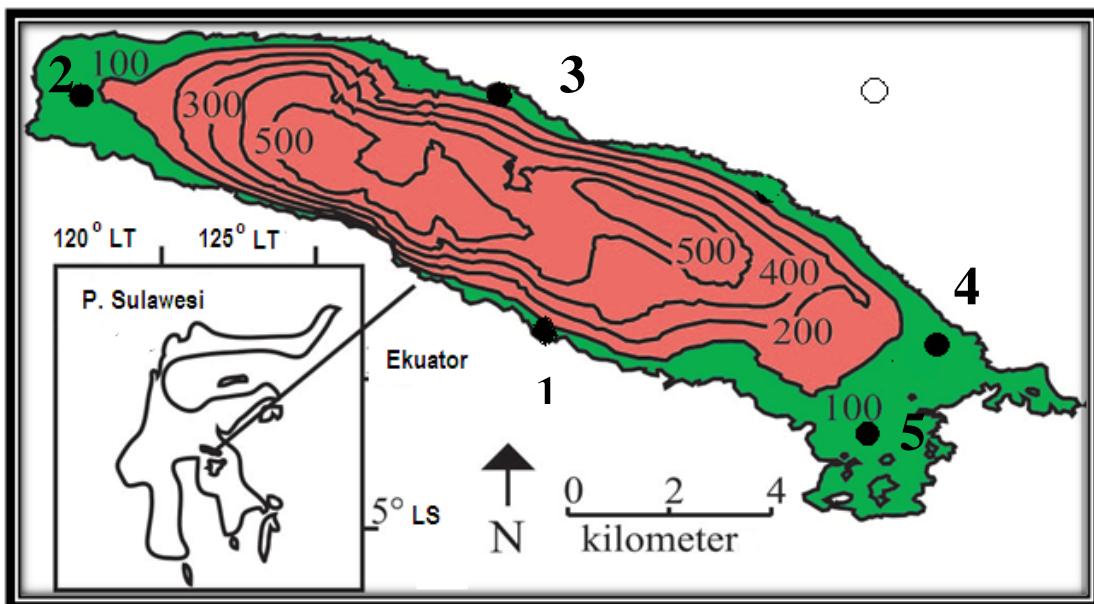
METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Contoh sedimen diambil di Danau Matano, Sulawesi Selatan, pada bulan Mei 2010. Contoh sedimen tersebut kemudian dianalisis di laboratorium Hidrokimia, Pusat Penelitian Limnologi LIPI, Cibinong, Kabupaten Bogor. Pengolahan dan analisa data dilakukan dari bulan Juni sampai November 2010.

Deskripsi Danau Matano dan Titik Sampling

Danau Matano terletak pada $2^{\circ}28'90''$ Lintang Selatan, dan $121^{\circ}17'90''$ Lintang Utara. Kedalaman maksimum 590 m, dan terletak pada ketinggian 380 m di atas permukaan laut. Berdasarkan peta batimetri (Gambar 1), terlihat bahwa setelah kedalaman 100 m, kondisi danau sudah bersifat anaerobik (merah), sedangkan pada kedalaman 100 meter ke permukaan, masih ber sifat aerobik (hijau) (Crowe *et al.* 2008). Kondisi inilah yang menjadi dasar pengambilan sedimen. Sedimen diambil dibagian danau yang masih bersifat aerobik dikarenakan pada kondisi inilah fosfat akan terendapkan. Sedangkan posisi geografis dan kedalaman sedimen yang diambil dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Peta batimetri Danau Matano (Crowe *et al.* 2008) dan titik pengambilan contoh sedimen

Tabel 1 Posisi geografis pengambilan sedimen di Danau Matano

Lokasi	Posisi	Kedalaman sedimen (meter)	Keterangan
Stasiun 1	LS 02°31,010" LT 121°21,487"	49,5	Dekan desa Sorowako
Stasiun 2	LS 02°26,559" LT 121°13,514"	70,0	Dekan desa Matano
Stasiun 3	LS 02°28,243" LT 121°23,763"	22,0	Dasar danau berbatu, hanya didapat sedimen dengan ketebalan 5 cm
Stasiun 4	LS 02°31,100" LT 121°26,635"	73,0	Merupakan <i>out let</i> danau
Stasiun 5	LS 02°32,068" LT 121°24,478"	50,0	Berpasir

Pengambilan dan Karakterisasi Fisika Kimia Sedimen

Sedimen diambil di titik-titik seperti pada Gambar 1. Sedimen diambil dengan menggunakan *sediment core*, penggunaan alat ini dimaksudkan untuk mengambil sedimen utuh sampai kedalaman sepanjang kolom *sediment core*. Sedimen diambil dengan hati-hati dan air yang ada diatas permukaan sedimen tidak tercampur di dalam kolom *sediment core*. Air yang berada di kolom air tersebut kemudian diukur pH, suhu, turbiditas dan oksigen terlarut dengan menggunakan *Water Quality Checker*

Horiba U-10, Sementara, fosfat terlarut (hasil penyaringan dengan kertas saring Millipore 0,45 μM), diukur dengan menggunakan spektrofotometer HACH 2800 dengan waktu pengukuran tidak lebih dari 24 jam (APHA AWWA, 1998).

Sebelum sedimen diambil, air yang berada di atas sedimen terlebih dahulu dibuang dengan menggunakan selang berdiameter 0,5 cm. Sedimen kemudian dibagi menjadi beberapa bagian dengan interval 5 cm. Penentuan pembagian dengan interval 5 cm memang tidak mencerminkan sejarah diagenensis sedimen tetapi menurut Mudroch & McKnight (1994), sedimen dengan ketebalan kurang lebih 5 cm dari permukaan adalah merupakan sedimen permukaan.

Sediment tersebut kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik berklip dan disimpan dalam kondisi dingin untuk menjaga proses lebih lanjut (menggunakan *Cooling box* atau disimpan di lemari pendingin). Sedimen kering didapat dengan mengeringkannya dalam inkubator pada suhu tidak lebih dari 40 °C selama 2 hari, dan kemudian dihaluskan dan diayak dengan ayakan 2 mm.

Komposisi logam makro besi (Fe), mangan (Mn), aluminium (Al) dan kalsium (Ca) dari sedimen kering ditetapkan dengan metode Spektrofotometer Serapan Atom setelah dilakukan pendekstrusian secara basah. Kontrol akurasi pengukuran Fe dan Mn dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sedimen dengan material referensi bersertifikat (*Certified Reference Material*, CRM) untuk sedimen sungai dengan nomor CRM LGC6187. Temu balik hasil pengukuran Fe dan Mn di sedimen dengan material sedimen sungai bersertifikat adalah 95,1-100,2% untuk Fe dan 101-124% untuk Mn.

Fraksinasi Fosforus

Fraksinasi fosforus ditetapkan menggunakan metode yang dilakukan oleh Kapanen (2008) yang merupakan modifikasi dari Hieltjes & Lijklema (1980). Penentuan total fosforus (TP) di sedimen dilakukan dengan menimbang 0,2 g sedimen kering pada cawan porselin dan diabukan pada suhu 550 °C selama 180 menit, didinginkan, setelah itu ditambahkan 5 mL HCl 0,5 M dan dikocok menggunakan alat pengocok Gyrorotary pada suhu ruangan selama 48 jam, kemudian dipisahkan dengan menggunakan sentrifuga (disentrifugasi) pada 1370 g selama 15 menit, dan disaring menggunakan kertas saring berpori (0,45 μM) dan kemudian hasil saringan ini dianalisis fosfatnya. Fraksi fosforus yang terikat oleh kalsium (HCl-P) dilakukan

dengan menimbang 200 mg contoh sedimen kering lainnya kemudian ditambahkan 5 mL HCl 0,5 M dan dikocok pada suhu ruangan selama 24 jam dan kemudian dilakukan pemisahan dengan sentrifuga dan disaring dengan kertas saring 0,45 μM . Hasil saringan tersebut kemudian dianalisis ortofosfatnya.

Untuk mendapatkan fraksi NH_4Cl yang merupakan fraksi fosforus yang terjerap bebas ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$), sebanyak 2 g sedimen kering ditambahkan 15 mL NH_4Cl 1M dan dikocok selama 2 jam pada suhu ruangan, disentrifugasi dan disaring, dan filtrat tersebut kemudian dianalisis ortofosfatnya. Fraksi Fe/Al-P (NaOH-P) didapat dengan mengocok 10 mL NaOH 0,1 M dan 100 mg contoh sedimen selama 24 jam pada suhu ruangan. Kemudian dipisahkan dengan sentrifuga dan dilanjutkan dengan penyaringan. Hasil filtratnya kemudian dianalisis ortofosfatnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Fisikokimia di Kolom Air Permukaan Danau Matano

Hasil pengukuran parameter fisikokimia di Danau Matano dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil ini menunjukkan bahwa, nilai pH air permukaan Danau Matano sedikit bersifat basa yaitu berkisar antara 8,31-8,38, suhu berkisar antara 27,3-28,7 °C, kekeruhan masih terbilang jernih karena nilainya berkisar antara 0-1 NTU dan konsentrasi fosfat (SRP) sangat rendah yaitu <0,001 mg/L.

Tabel 2. Hasil analisis pengukuran fisikokimia di air permukaan Danau Matano

Lokasi	pH	Suhu °C	DO mg/L	Kekeruhan NTU	PO_4^{3-} mg/L
Stasiun 1	8,32	27,7	4,05	1	<0,001
Stasiun 2	8,31	27,6	3,44	0	<0,001
Stasiun 3	8,34	28,7	6,71	0	<0,001
Stasiun 4	8,38	28,1	5,98	0	<0,001
Stasiun 5	8,36	27,3	4,01	0	<0,001

Keadaan aerobik di air permukaan Danau Matano ditunjukkan dengan kandungan oksigen terlarut yang masih tinggi, berkisar antara 3,44-6,70 mg/L. Hasil ini sesuai yang dilaporkan Crowe (2008), dimana kondisi aerobik ditemukan di kolom air Danau Matano sampai kedalaman 100 m. Oleh karena itu, sedimen yang diambil adalah

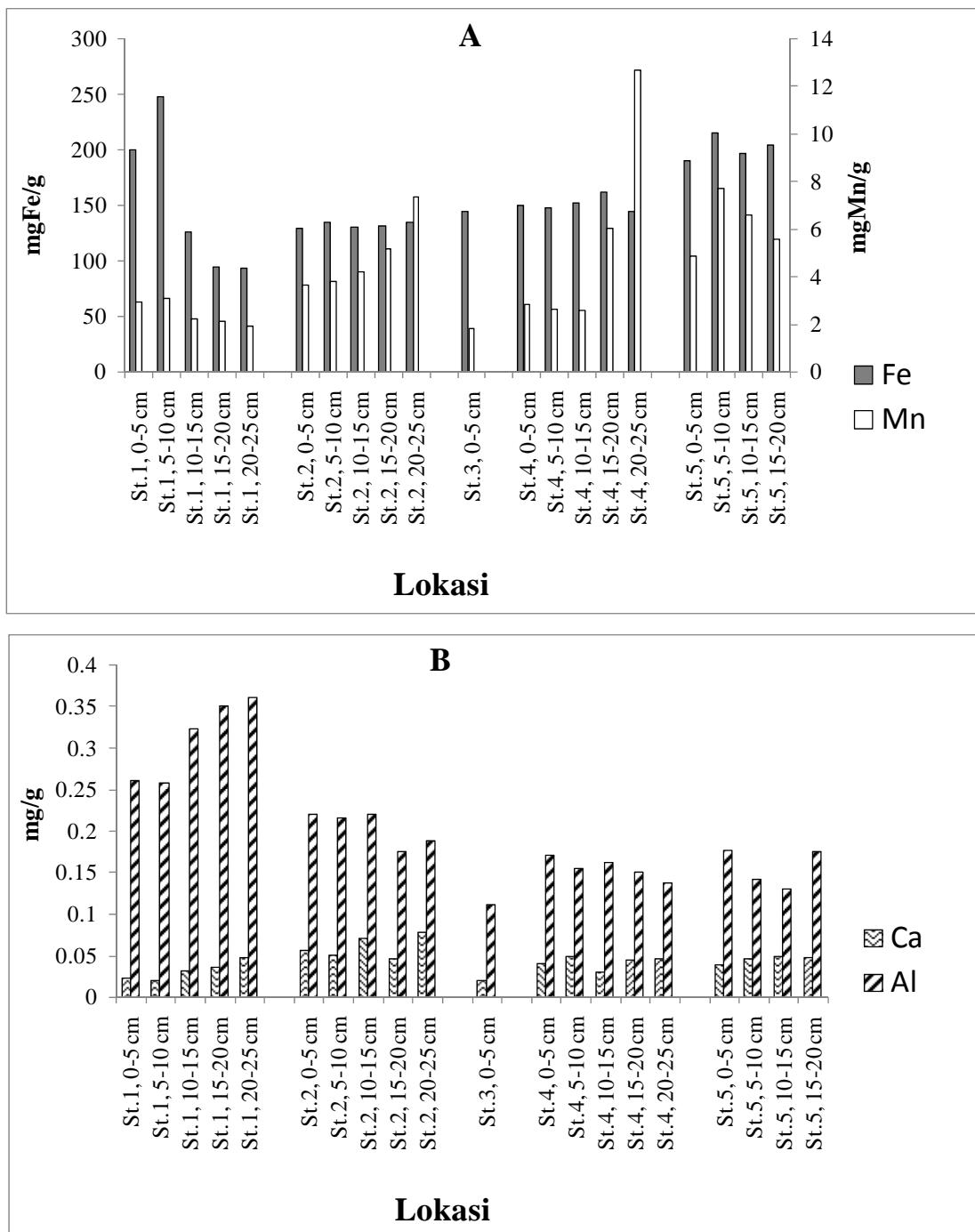
sedimen yang masih berada dalam kontur aerobik. Pada kondisi aerobik maka fosfat akan cenderung terikat dengan logam-logam seperti besi (Fe), mangan (Mn) dan aluminium (Al) (Reddy & Delaune 2008).

Konsentrasi fosfat terlarut (SRP) relatif rendah (<0,001 mg/L). Rendahnya konsentrasi SRP (<0,001 mg/L) pada zona aerobik di Danau Matano juga dilaporkan oleh Crowe (2008). Kondisi ini merupakan ciri dari danau-danau yang oligotrofik (miskin unsur hara). Pada keadaan aerobik fosfat akan cenderung terikat pada partikulat dan akan terdeposit ke dasar danau.

Karakteristik Sedimen

Distribusi Logam Makro (Total Fe, Mn, Al, dan Ca)

Dari hasil analisis terlihat bahwa logam Fe adalah logam yang paling tinggi konsentrasinya bila dibandingkan dengan logam lainnya. Konsentrasi logam Fe rata-rata 100 kali lebih besar bila dibandingkan dengan logam Mn yang berkisar antara 93,831-248,301 mgFe/g sedimen kering. Konsentrasi logam Fe paling tinggi ditemukan di Stasiun 1 pada kedalaman sedimen antara 5-10 cm, sedangkan terendah di stasiun 1 pada kedalaman 20-25 cm. Pola distribusi logam Fe di stasiun 1 terlihat berpola menurun dengan bertambahnya kedalaman sedimen, sedangkan di stasiun lainnya, tidak menunjukkan pola menurun atau menaik dengan bertambahnya kedalaman.



Gambar 2 Distribusi logam makro pada sedimen di Danau Matano; A. Logam Fe dan Mn; B. Logam Ca dan Al.

Tingginya Konsentrasi Fe di Danau Matano yang oligotrofik ini, dikarenakan adanya pengaruh tanah leterit yang mengelilingi danau yang didominasi oleh *nickelliferous* (mengandung sekitar 60% besi oksida). Tingginya besi di daerah

tangkapan ini menyebabkan Danau Matano menerima masukan alogenik besi (hidroksida) oksida yang besar dan mempunyai peran penting dalam proses geokimia di Danau Matano (Crowe 2008).

Sedangkan konsentrasi logam Mn tertinggi ditemukan di Stasiun 4 pada kedalaman 20-25 cm yaitu 12,672 mgMn/g sedimen kering, sedangkan terendah di stasiun di stasiun 3 yaitu 1,801 mgMn/g sedimen kering. Konsentrasi logam Al 800 kali lebih rendah bila dibandingkan dengan logam Fe. Konsentrasi logam Al berkisar antara 0,112-0,361 mgAl/g sedimen kering. Rata-rata konsentrasi logam Al di stasiun 1 ternyata lebih tinggi bila dibandingkan dengan stasiun lainnya, dan berpola menaik dengan bertambahnya kedalaman.

Pola yang menaik berdasarkan kedalaman terlihat pula pada konsentrasi Ca di Stasiun 1. Konsentrasi Ca berkisar antara 0,020-0,078 mgCa/g sedimen kering. Logam Ca adalah logam yang konsentrasi terendah bila dibandingkan dengan logam makro Fe, Mn dan Al. Logam Ca dapat berikatan dengan senyawaan fosforus membentuk suatu endapan mineral apatit. Senyawaan fosforus yang berikatan dengan logam Ca akan lebih teroklusi dan akan larut ketika kondisi pH perairan bersifat lebih asam.

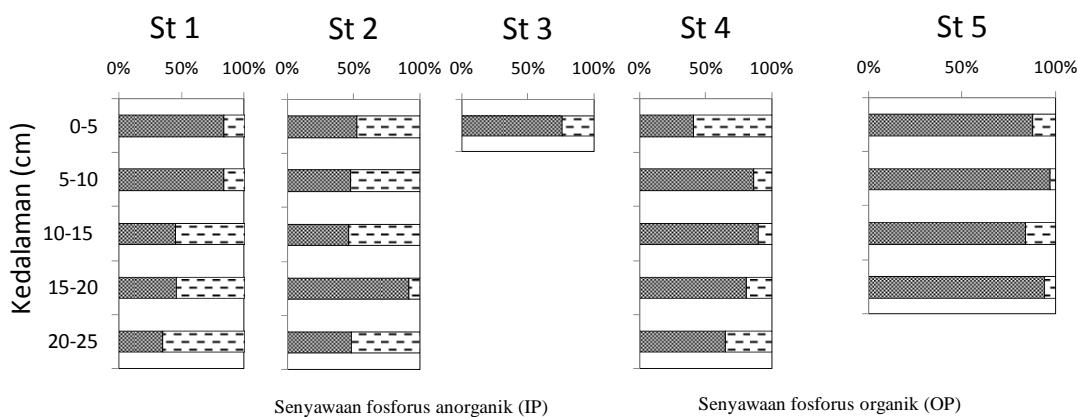
Fraksinasi Senyawaan Fosforus di Sedimen

Konsentrasi total fosforus (TP) di sedimen tergantung dari komposisi sedimen, laju proses sedimentasi, dan kondisi sifat fisiko-kimia. Total konsentrasi fosforus di sedimen tidak dapat menentukan apakah sedimen ini akan membahayakan atau tidak secara ekologi. Oleh karena itu, fraksinasi senyawaan fosforus di sedimen adalah parameter yang sangat penting untuk memperkirakan masukan internal senyawaan fosforus ke badan air. Faktor-faktor yang mempengaruhi pelepasan senyawaan fosforus terdiri dari reaksi redoks, penjerapan, kelarutan fase mineral dan mineralisasi dari senyawaan organik (Kaiserli *et al.* 2002).

Fraksinasi senyawaan fosforus di sedimen Danau Matano dilakukan dengan metode ekstraksi menggunakan larutan NH₄Cl, NaOH, dan HCl. Fraksi fosforus yang terekstraksi dengan larutan NH₄Cl adalah fraksi fosforus yang mudah lepas/dapat tukar (NH₄Cl-P). Fraksi fosforus yang terekstraksi dengan larutan NaOH adalah fraksi senyawaan fosforus yang terikat dengan Fe dan Al (NaOH-P), sedangkan fraksi fosforus yang terikat dengan logam kalsium diekstrak dengan menggunakan larutan HCl (HCl-

P). Total fosforus (TP) didapat dari hasil ekstraksi dengan pelarut HCl yang terlebih dahulu sedimen tersebut dilakukan pemanasan pada suhu 550 °C dalam tanur. Fraksi senyawaan fosforus anorganik (IP) adalah senyawaan fosforus hasil jumlah dari NaOH-P, HCl-P dan NH₄Cl-P dan senyawaan fosforus organik (OP) adalah selisih antara konsentrasi TP dan IP (Kappanen 2008).

Hasil fraksinasi senyawaan fosforus anorganik (IP) dan organik (OP) dapat dilihat pada Gambar 3. Secara keseluruhan kecuali stasiun 1, terlihat bahwa senyawaan fosforus anorganik lebih mendominasi bila dibandingkan senyawaan fosforus organik di setiap stasiun. Persentasi senyawaan IP di stasiun 1, ternyata akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Lebih tingginya persentase senyawaan IP bila dibandingkan dengan senyawaan OP mencirikan bahwa Danau Matano adalah danau yang masih bersifat oligotrofik. Masukan senyawaan organik sangat kecil sehingga ketersediaan senyawaan P di sedimen Danau Matano mempunyai persentase yang rendah.

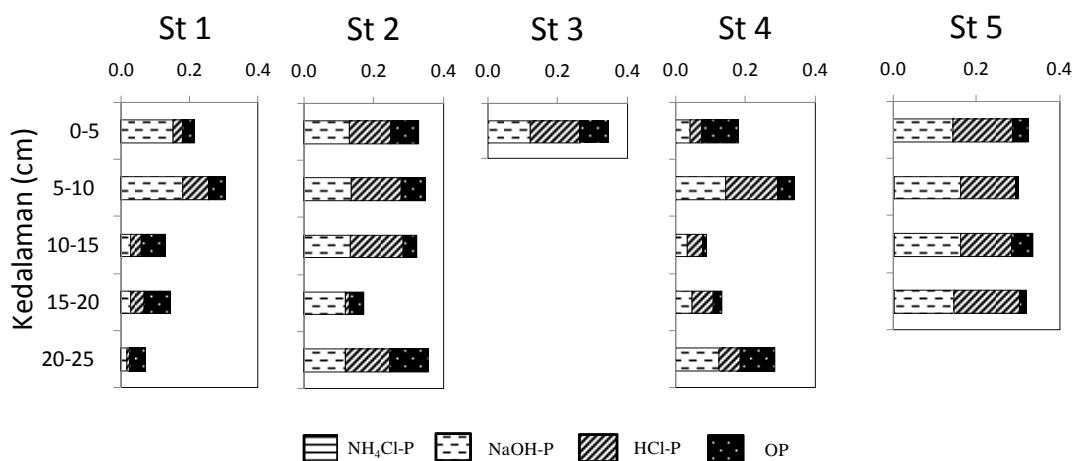


Gambar 3 Prosentasi fraksi senyawaan fosforus anorganik dan organik di sedimen.

Senyawaan Fosforus Yang Mudah Terlepaskan (NH₄Cl-P)

Fraksi NH₄Cl-P adalah senyawaan P yang mudah terlepas walaupun kondisi kolom air bersifat aerobik. Fraksi ini berada dalam air pori (*porewater*) yang berasal dari lepasnya senyawaan fosforus yang berikatan CaCO₃ dan juga dapat berasal dari perombakan senyawaan organik dari detritus (*bahan organik* dari organisme telah mati yang didekomposisi oleh mikroorganisme) (Kaiserli *et al.* 2002). Parameter ini sangat penting untuk mengetahui bioavailabilitas dari P di sedimen danau karena sifatnya yang terlarut di air dan dengan mudah tersedia untuk pertumbuhan alga atau tanaman air (Zhou *et al.* 2001).

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa fraksi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ merupakan fraksi dengan prosentase yang rendah (<0,5% dari TP) bila dibandingkan dengan fraksi lain yang menyusun senyawaan fosforus anorganik. Kisaran konsentrasi relatif rendah (<0,0001-0,0005 mgP/g).



Gambar 4 Distribusi fraksinasi senyawaan Fosforus (mg/g).

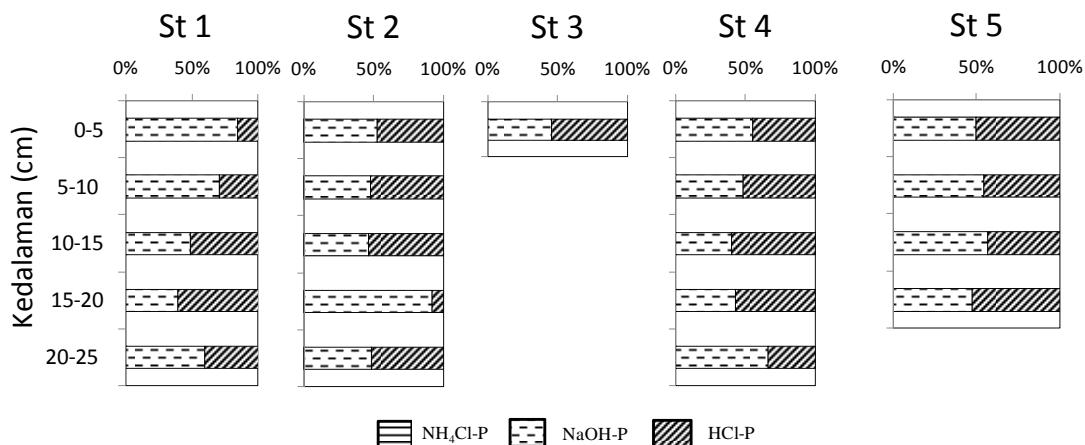
Senyawaan Fosforus yang Terikat dengan Logam Fe dan Al (NaOH-P).

NaOH-P adalah senyawaan fosforus yang terikat dengan logam Fe dan Al. Fraksi ini digunakan untuk memperkirakan ketersedian P di sedimen baik untuk jangka pendek maupun jangka panjang yang merupakan ukuran dari ketersediaan P untuk pertumbuhan alga di perairan (Zhou *et al.* 2001). Dapat tukarnya fraksi ini ke perairan sangat dipengaruhi oleh kondisi oksigen terlarut, dimana bila kondisi perairan bersifat anaerobik maka senyawaan fosforus ini akan terlepaskan (Kaiserli *et al.* 2002).

Dari Gambar 4, terlihat bahwa konsentrasi senyawaan NaOH-P di setiap stasiun menunjukkan pola yang berbeda berdasarkan kedalaman. Di stasiun 1, dengan bertambahnya kedalaman, konsentrasi NaOH-P menurun, sedangkan di stasiun 4 tidak dijumpai pola menaik/menurun berdasarkan kedalaman. Konsentrasi di stasiun 2 dan 5 terlihat tidak berubah bila dilihat berdasarkan kedalaman. Konsentrasi terendah ditemukan di stasiun 1 pada kedalaman sedimen 20-25 cm, sedangkan ter tinggi di stasiun 1 pada kedalaman sedimen 5-10 cm yaitu dengan konsentrasi berturut-turut adalah 0,0147 dan 0,1792 mgP/g sedimen kering.

Senyawaan Fosforus yang Terikat dengan Logam Ca (HCl-P).

Fraksi HCl-P ini adalah senyawaan fosforus yang keberadaan di sedimen terutama dikarenakan keterikatannya dengan logam Ca. Senyawaan ini biasanya ditemukan dalam bentuk mineral apatit. Fraksi ini sangat sensitif terhadap kondisi pH di perairan, bila pH diperairan lebih bersifat asam maka P yang dalam mineral apatit tersebut akan terdisolusi menjadi senyawaan P yang larut. Senyawaan P yang terikat dengan logam Ca ini adalah senyawaan yang relatif stabil dan akan menjadi endapan permanen di suatu sedimen (Kaiserli *et al.* 2002).



Gambar 5 Prosentase fraksinasi senyawaan fosforus anorganik.

Distribusi fraksi HCl-P di Danau Matano, relatif mirip dengan pola fraksi NaOH-P. Di stasiun 1, distribusi menurut kedalaman sedimen cenderung menurun sedangkan di stasiun 2 menunjukkan kecendrungan pola yang sebaliknya. Distribusi di stasiun 2 dan 5, cenderung hampir sama antara konsentrasi di lapisan permukaan sampai pada sedimen yang terdalam. Konsentrasi yang terendah ditemukan di Stasiun 1, pada kedalaman 20-25 cm, sedangkan yang tertinggi ditemukan di Stasiun 5 pada kedalaman 20-25 cm, berturut-turut konsentrasinya adalah 0,0098 dan 0,1577 mgP/g sedimen kering.

Rata-rata prosentase penyusun fraksi fosforus anorganik ini berkisar antara 30-45% dan ini menunjukkan kecendrungan senyawaan P terendapkan secara permanen cukup besar di Danau Matano. Bila dibandingkan dengan danau oligotrofik Stechlin,

Jerman, konsentrasi fraksi HCl-P di danau ini relatif sedikit lebih rendah, konsentrasi di danau Stechlin adalah 0,200 mgP/g (Kaiserli *et al.* 2002).

Total Fosforus (TP) di Danau Matano

Distribusi TP di Danau Matano dapat dilihat pada Gambar 10. Total fosforus adalah penjumlahan dari konsentrasi IP dan OP. Konsentrasi TP distribusinya bervariasi berdasarkan stasiun dan pada kedalaman. Pola distribusi terlihat jelas di stasiun 1, dimana berdasarkan kedalaman pola konsentrasinya cenderung menurun, sedangkan di Stasiun 4, walaupun konsentrasi di lapisan sedimen bagian 5-10 cm relatif tinggi tetapi di lapisan 10-15 cm konsentrasinya turun drastis dan setelah itu cenderung menaik dengan bertambahnya kedalaman sedimen. Konsentrasi TP di ketiga stasiun lainnya cenderung hampir seragam antara sedimen di lapisan permukaan dengan yang berada di bawahnya.

Konsentrasi terendah ditemukan di Stasiun 1, yaitu pada lapisan kedalaman sedimen 20-25 cm, sedangkan konsentrasi tertinggi ditemukan di stasiun 2 pada kedalaman lapisan sedimen 5-10 cm, konsentrasi TP berturut-turut adalah 0,0701 dan 0,3552 mg/g sedimen kering. Bila dibandingkan dengan konsentrasi TP di danau lainnya seperti danau oligotrofik Stechlin, konsentrasi Danau Matano hampir 8 kali lebih kecil, bahkan hampir 1000 kali lebih rendah bila dibandingkan dengan danau eutrofik Taihu di Cina. Konsentrasi di Danau Stechlin adalah 2.389 mg/g (Gonsiorczyk *et al.* 1998) dan Danau Taihu adalah 451,3 mg/g (Jin *et al.* 2005).

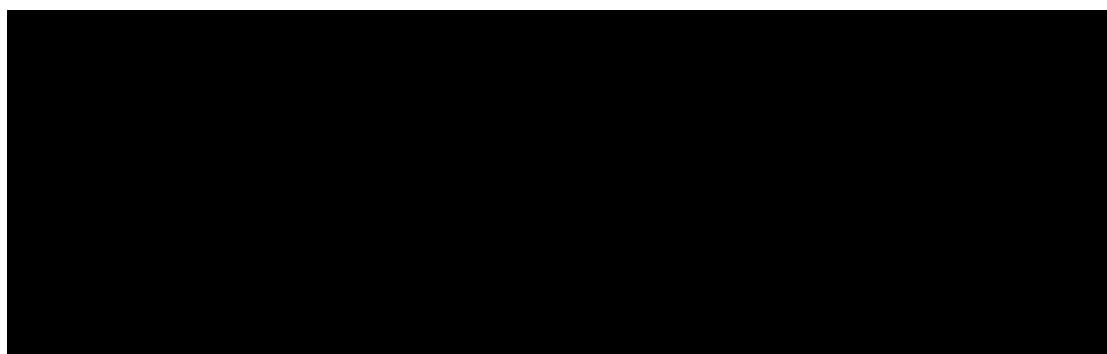
Diskusi

Keberadaan senyawaan fosforus tidak terlepas dari kondisi dari perairan litoral danau tersebut. Kondisi kolom air di litoral Danau Oligotrofik Matano masih bersifat aerobik sampai kedalaman 100 m. Kondisi ini membuat konsentrasi ortofosfat di permukaan Danau Matano akan terjerap dan mengendap ke dasar danau. Jatuhnya partikulat senyawaan fosfat ke dasar danau dapat terjerap secara fisik maupun kimia. Ketika ortofosfat terjerap secara fisik, maka walaupun kondisi kolom air bersifat aerobik, maka ortofosfat akan dapat terlepas kembali ke kolom air bila kondisi konsentrasi di kolom air lebih kecil bila dibandingkan dengan konsentrasi kesetimbangan ortofosfat yang terjerap bebas di sedimen.

Terlepasnya senyawaan fosfat ke kolom badan air dari sedimen di bagian litoral danau Matano, nampaknya kecil kemungkinan terjadi, hal ini disebabkan kecilnya konsentrasi fraksi yang terjerap bebas ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$) di danau oligotrofik ini. Rendahnya konsentrasi fraksi fosforus $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ menunjukkan bahwa fosforus yang terjerap kurang tersedia bagi pertumbuhan alga. Rendahnya konsentrasi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ di sedimen yang merupakan ciri danau yang bersifat oligotropik juga ditemukan di danau oligotrofik di Jerman yaitu Danau Stechlin yaitu dengan konsentrasi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ berkisar antara 0,001-0,003 mgP/g (Gonsiorczyk *et al.* 1998). Konsentrasi fraksi ini di Danau Matano terlihat lebih kecil 10 kali bila dibandingkan dengan danau lain seperti Danau Volvi yang mesotropik di Yunani (Kaiserli *et al.* 2002), dan bahkan hampir 200 kali lebih kecil bila dibandingkan dengan konsentrasi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ di danau volkanik Azore di Portugal (Ribeiro *et al.* 2008).

Senyawaan ortofosfat yang terikat secara kimiawi, dapat dilihat dari fraksi yang terikat oleh senyawaan Fe/Mn (NaOH-P) dan Ca (HCl-P). Di sedimen Danau Matano, keberadaan fraksi NaOH-P di Danau Matano terlihat sangat berhubungan erat dengan konsentrasi logam Fe dan Al (Tabel 4). Walaupun koefisien korelasi Pearson tidak terlalu kuat yaitu hanya 0,667 dan 0,456 ($p<0,05$), tetapi keberadaan kedua logam ini sangat mempengaruhi konsentrasi fraksi NaOH-P di Danau Matano. Sedangkan terikatnya senyawaan P dengan logam Ca sedikit berhubungan dengan distribusi konsentrasi logam Ca di sedimen Danau Matano, hal ini dikuatkan dengan kecilnya koefisien korelasi antara fraksi HCl-P dengan konsentrasi logam Ca yaitu 0,494 ($p<0,05$) (Tabel 3).

Tabel 3 Hasil korelasi antara fraksinasi fosforus dengan logam makro di sedimen Danau Matano.

A large rectangular area of the page has been completely blacked out, obscuring all text and data. It appears to be a redacted table or figure from the original document.

Keberadaan senyawaan NaOH-P di sedimen Danau Matano adalah parameter penting yang berhubungan dengan eutrofikasi di Danau Matano. Senyawaan ini adalah cadangan senyawaan P yang tersimpan di sedimen Danau Matano. Sedimen yang diambil dalam penelitian ini adalah sedimen yang berada dalam kontur perairan yang masih bersifat aerobik, sehingga bentuk dari senyawaan ini cenderung terikat di sedimen Danau Matano. Bila kondisi kolom air Danau Matano berubah menjadi anaerobik maka senyawaan ini akan terlepaskan dan memicu pertumbuhan alga sehingga danau tersebut akan berubah menjadi danau yang subur.

Walaupun fraksi NaOH-P di Danau Matano ini rata-rata prosentasenya hampir 50% dari komposisi senyawaan fosforus anorganik (IP) (Gambar 5), tetapi konsentrasi senyawaan ini masih lebih rendah bila dibandingkan dengan konsentrasi senyawaan NaOH-P di danau oligotrofik lainnya seperti Danau Stechlin, Jerman (0,200 mgP/g) (Gonsiorczyk *et al.* 1998).

Rendahnya konsentrasi TP sedimen Danau Matano bila dibandingkan dengan danau lain, menunjukkan bahwa Danau Matano, secara jangka panjang memiliki masukan internal yang kecil sehingga masukan eksternal dari Danau Matano dapat menjadi parameter kunci distribusi senyawaan P di kolom badan air Danau Matano. Fenomena inipun dikuatkan dengan adanya korelasi TP dengan fraksi senyawaan P di sedimen yang tidak terjerap bebas (IP, NaOH-P, dan HCl-P), dikarenakan kondisi kolom air Danau Matano yang aerobik dan sedikit basa maka kecendrungan P tertahan di sedimen akan lebih kuat. Dari Tabel 3 terlihat bahwa koefisien korelasi menunjukkan pola hubungan yang kuat antara TP dan IP ($R=0,907$, $p<0,05$), TP dengan NaOH-P ($R=0,851$, $p<0,05$) dan TP dengan HCl-P ($R=0,872$, pada $p<0,05$).

Tidak adanya korelasi antara TP dengan $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ menunjukkan bahwa secara jangka pendek, masukan internal tidak dipengaruhi oleh tingginya konsentrasi TP di sedimen Danau Matano dan keberadaan fraksi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ diduga dapat dipengaruhi oleh konsentrasi fosfat di kolom badan air Danau Matano.

KESIMPULAN

Karakteristik sedimen Danau Matano didominasi oleh logam besi, dan fraksi NaOH-P dan HCl-P. Konsentrasi $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ sangat rendah ($<0,0001-0,0005$ mgP/g)

sehingga sedimen Danau Matano tidak berpotensi sebagai faktor internal bagi kolom air Danau Matano, hal ini menyebabkan resuspensi dari fosfat yang tersedia terlihat dibatasi dengan nilai konsentrasi NH₄Cl-P yang kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Canfield DE, Kristensen E, Thamdrup BO. 2005. *Aquatic Geomicrobiology, Advance in Marine Biology*. Volume ke-48. Oxford: Elsevier Academic Press.
- Crowe SA. 2008. Biogeochemical cycling in iron-rich Lake Matano, Indonesia: An early ocean analogue [disertasi]. Montreal: McGill Univ.
- Fernandez-Leborans G, Zitzler K, Gabilondo R. 2006. Epibiont protozoan communities on Caridina lanceolata (Crustacea, Decapoda) from the Malili lakes of Sulawesi (Indonesia). *Zoologischer Anzeiger* 245:167–19.
- Goldman RC, Horne AJ. 1983. *Limnology*. Tokyo: Mc-Graw Hill International Book Company.
- Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. 1998. Phosphorus binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic district (Germany). *Water Sci. Technol* 37(3):51–58
- Haffner GD, Hehanussa PE, Hartoto DI. 2001. The biology and physical processes of large lakes of Indonesia. Di dalam: Munawar M, Hecky RE, editor. *The Great Lakes of the World: Food-web, Health, and Integrity*. Leiden: Backhuys Publishers. hlm 183–194.
- Hieltjes AHM, Lijklema L. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *J. Environ Qual* 9:405–407.
- Jin X, Wang S, Pang Y, Zhao HX, Zhou. 2005. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspect* 254:241–248.
- Kaiserli AD, Voutsas, Samara C. 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments – Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere* 46:1147–1155.
- Kapanen G. 2008. Phosphorus fractionation in lake sediments. *Estonian Journal of Ecology* 57(4):244-255.
- Katsev S, et al. 2010. Mixing and its effects on biogeochemistry in the persistently stratified, deep, tropical Lake Matano, Indonesia. *Limnol Oceanogr* 55(2):763–776.
- Meixner MJ et al. 2007. Phylogenetic analysis of freshwater sponges provide evidence for endemism and radiation in ancient lakes. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 45:875–886.
- Mudroch, MacKnight. 1994. *Handbook of Techniques for Aquatic Sediment Sampling*. Boca Raton: Lewis Publisher.
- Reddy R, DeLaune RD. 2008. *Biogeochemistry Of Wetlands: Science And Applications*. London: CRC Press.

- Ribeiro DC, Martins G, Nogueira R, Cruz JV, Brito G. 2008. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores – Portugal). *Chemosphere* 70:1256–1263.
- Sabo EDR, Hamilton PB, Hehanussa PE, McNeely R, Haffner GD. 2008. The plankton community of Lake Matano: factors regulating plankton composition and relative abundance in an ancient, tropical lake of Indonesia. *Hydrobiologia* 615:225–235.
- Smith DR, Warnemuende EA, Haggard BE, Huang C. 2006. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance. *Ecological Engineering* 27:71–78.
- Schwarzer J, Herder F, Miso B, Hadiaty RK, Schliewen UK. 2008. Gene flow at the margin of Lake Matano's adaptive sailfin silverside radiation: Telmatherinidae of River Petea in Sulawesi. *Hydrobiologia* 615:201–213.
- Stumm W, Morgan JJ. 1996. *Aquatic Chemistry: an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Water*. Ed ke-8. Ontario: John Wiley & Sons. Inc.
- Zhou Y, et al. 2008. Phosphorus Fraction and Alkaline phosphatase activity in sediments of a large eutrophic Chinese Lake (Lake Taihu). *Hydrobiologia* 599:119-125.