

## BOX MODEL AIR TAWAR, SALINITAS DAN ZAT HARA DI DELTA MAHAKAM KALIMANTAN TIMUR

Hadikusumah<sup>\*)</sup> dan Marojahan Simanjuntak

Bidang Dinamika Laut, Pusat Penelitian Oseanografi, LIPI, Jakarta 14430, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: hadi\_kusumah@yahoo.com

---

### Abstrak

Penelitian telah dilaksanakan di bagian selatan Delta Mahakam, Kalimantan Timur. Metode pengukuran suhu, salinitas, transmisi cahaya dan turbiditas dengan menggunakan CTD Model 603 SBE dan pengukuran arus dan batimetri menggunakan ADCP Model RDI. Pengukuran parameter kimia zat hara yaitu berdasarkan contoh air yang diambil dengan menggunakan botol Nansen dari dua kedalaman. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui mekanisme transport massa air tawar, salinitas dan zat hara dari daratan Sungai Mahakam yang berinteraksi dengan air laut dengan menggunakan metode box model. Hasil penelitian menggambarkan bahwa distribusi vertikal salinitas di Delta Mahakam didapatkan mempunyai stratifikasi yang tinggi (*highly stratified*), dimana air tawar bersalinitas 12,30 psu mengalir di bagian permukaan sungai ke arah laut, dan air laut bersalinitas tinggi 30,07 psu mengalir masuk ke arah sungai berada di bawah permukaan yang dipisahkan oleh lapisan percampuran (*mixing layer*). Budget air tawar yang menuju ke arah laut ( $V_{Surf}$ ) didapatkan sebesar  $0,0306 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , dan budget salinitas air laut yang masuk dalam sistem lapisan dasar ( $V_{Deep} \cdot S_{Ocn-d}$ ) didapatkan sebesar  $20,727 \times 10^9 \text{ psu day}^{-1}$ . Adapun, waktu pengenceran ( $\tau_{Syst}$ ) didapatkan sebesar  $0,245 \text{ day}^{-1}$  atau 5,87 jam. Budget zat hara pada lapisan permukaan didapatkan dengan sistem yang bersifat autotrofik sedangkan di lapisan dekat dasar cenderung bersifat heterotrofik.

### Abstract

**Box Model of Freshwater, Salinity and Nutrient in the Delta Mahakam East Kalimantan.** Research has been conducted in the southern part of the Mahakam Delta, East Kalimantan. Method of measuring temperature, salinity, light transmission and turbidity by using CTD model 603 SBE and current measurement and bathymetry by using ADCP model RDI. Measurement parameters on the nutrient chemistry are based of water samples taken using Nansen bottles from two depths. The purpose of this study to determine the mechanism of freshwater, salinity and nutrient transport from the land of the Mahakam River which interact with seawater by using box models. The results illustrate that the vertical distribution of salinity in the Mahakam Delta has obtained a high stratification, where the freshwater salinity 12.30 psu at the surface of a river flowing toward the sea, and seawater of high salinity 30.07 psu flowing in the direction river under the surface that are separated by a layer of mixture. Freshwater budget of the sea ( $V_{Surf}$ ) obtained for  $0,0306 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , and the sea water salinity budget is going into the bottom layer system ( $V_{Deep} \cdot S_{Ocn-d}$ ) obtained for  $20,727 \times 10^9 \text{ psu day}^{-1}$ . While time dilution ( $\tau_{Syst}$ ) obtained for  $0.245 \text{ day}^{-1}$  or 5.87 hours. Nutrient budget in the surface layer obtained by the system is autotrophic while in layers near the bottom tend to be heterotrophic.

*Keywords: box model, freshwater, Mahakam Delta, nutrient, salinity*

---

### 1. Pendahuluan

Delta Mahakam yang terletak di Kalimantan Timur merupakan contoh kasus yang ideal yang dapat digunakan untuk mempelajari dinamika muara yaitu interaksi antara air tawar (*freshwater*) dari darat dan salinitas dari Selat Makassar yang dibawa oleh tenaga pasut saat pasang. Sungai Mahakam adalah salah satu sungai terbesar di Indonesia yang terletak di Provinsi

Kalimantan Timur yang bermuara di Selat Makassar. Bahan dasar dari daratan berupa bahan padat atau cair yang dibawa oleh air hujan melalui sungai dan seterusnya ke muara atau ke perairan pantai ialah datang dari lokasi yang lebih tinggi.

Delta Mahakam merupakan sebuah konfigurasi dari 46 pulau-pulau kecil yang membentuk kipas membentang keluar ke daerah pesisir Selat Makassar, Kalimantan

Timur. Secara geologis Delta Mahakam telah dibentuk melalui deposisi jangka panjang padatan tersuspensi dari 770 km panjang Sungai Mahakam. Selain yang tinggi dalam keanekaragaman hayati, dan berlimpah sumber daya minyak dan gas berdasarkan laporan Sidik [1].

Duxbury *et al.* [2] menjelaskan bahwa debit sirkulasi sungai membawa buangan dan mengakumulasi sedimen menuju laut dan menyebarkan ke dalam sistem lautan yang lebih besar. Begitu juga sirkulasi material organik dan *juvenile* organisme yang dihasilkan di sungai dipindahkan menuju muara, sementara air yang kaya akan salinitas dibawa menuju muara untuk mengisi kandungan salinitasnya. Menurut Pipkin *et al.* [3] salah satu yang membedakan karakteristik sebuah muara adalah pola sirkulasi yang tidak biasa terutama dipengaruhi oleh dua faktor (densitas dan pasang surut). Hettiarachchi [4] menyatakan air tawar dari buangan sungai dan air laut dari pasang surut merupakan dua parameter penting yang membangun ekologi dan sifat hidrologi lingkungan muara.

Menurut Triatmodjo [5] pada waktu periode pasang gelombang pasang surut akan menjalar ke dalam muara sampai pada jarak cukup jauh dari muara, yang disertai dengan transpor massa air laut dalam jumlah yang sangat besar. Selain dari laut, dari muara juga mengalir debit sungai. Kedua budget tersebut berlawanan arah sama seperti laporan di muara Cisadane, Tangerang Hadikusumah *et al.* [6]. Akibatnya massa air laut dan sungai akan terakumulasi di muara. Pada waktu air surut massa air tersebut keluar lagi dari muara kembali ke laut.

Supriadi [7] menyatakan bahwa ketersediaan zat hara di muara dapat dipengaruhi oleh fluktuasi relatif pasang surut dan aliran permukaan (*run off*) dari daratan atau buangan limbah melalui sungai. Pasokan zat hara tersebut terjadi pada saat air surut melalui pembilasan pasang surut dan di bagian hulu sungai. Pada saat air surut, massa air sungai akan lebih dominan sehingga menambah larutan unsur-unsur zat hara menjadi lebih tinggi dibandingkan pada saat air pasang. Pada perairan yang lebih dangkal pergerakan massa air lebih didominasi oleh arus pasang surut, oleh karena itu proses pencampuran massa air dari dasar bisa naik ke permukaan dan membawa unsur-unsur zat hara. Melalui suatu kombinasi antara pasang surut secara horisontal dan aliran massa air dengan salinitas berbeda, membuat kecenderungan zat hara terperangkap dalam muara. Perairan Kalimantan Timur termasuk perairan yang kandungan planktonnya tinggi. Kesuburan perairan tersebut dipengaruhi oleh masukan zat hara dari perairan mangrove dan sungai-sungai di Kalimantan Timur seperti Delta Mahakam. Disamping itu juga disebabkan oleh naiknya air dari lapisan dasar ke permukaan akibat arus lintas Indonesia (Arlindo) yang

menyebabkan penyuburan bagian selatan daerah penelitian Sutomo *et al.* [8].

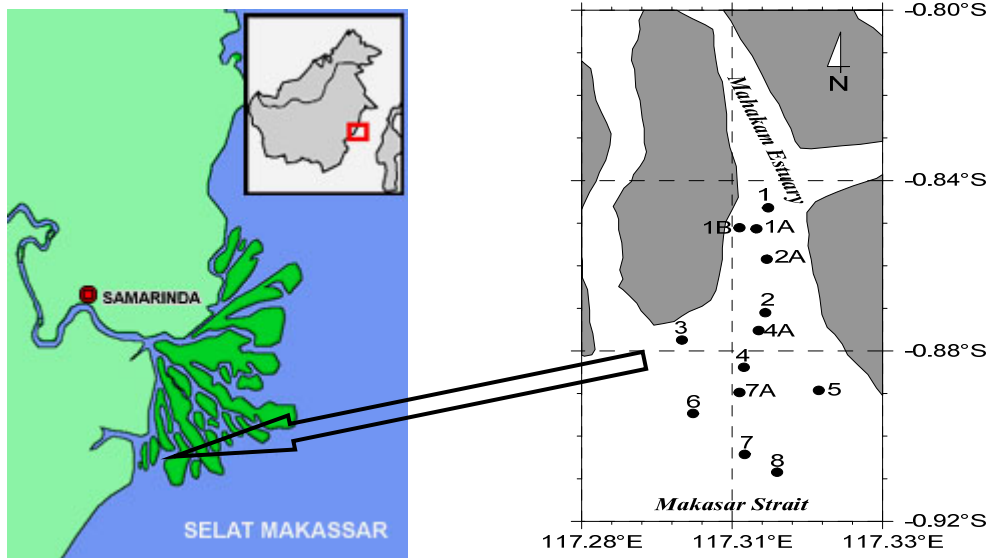
Penelitian menggunakan metode box model di muara dan teluk telah banyak dilakukan di berbagai negara melalui program *Land Ocean Interaction In The Coastal Zone* (LOICZ) oleh Gordon *et al.* [9], misalnya di Australia yang dijelaskan Smith *et al.* [10] dan Dupra [11], namun di perairan Indonesia baru dikembangkan untuk di muara Cisadane 2005 Anon., [12] dan Hadikusumah [13] dan Delta Mahakam tahun 2005 Anon., [14].

Penelitian studi budget massa air, nutrient dan sedimen dengan menggunakan box model telah dikembangkan oleh Mahmood *et al.* [15] di Sungai Hatiya Channel, Bangladesh. Demikian, Meghana *et al.* [16] tentang budget biogeokimia di Muara Tapi, India. Asif *et al.* [17] tentang perhitungan budget nutrient di Sungai Indus, Pakistan. Samarawickrama1 *et al.* [18] melakukan penelitian tentang penilaian budget nutrient di Lunawa Lagoon, Sri Lanka. Liu *et al.* [19] melakukan penelitian tentang budget nutrient di Muara Cina Besar. Lambert [20] menjelaskan bahwa Delta Mahakam merupakan delta campuran yang didominasi oleh fluvial dan gelombang terletak di bagian timur pulau Kalimantan; dan distribusi fauna benthik di sistem delta dipengaruhi oleh gabungan atau aksi antagonis dari parameter utama: air tawar, sedimen, pasang surut, dan arus drif dari utara ke selatan. Boonphakdee *et al.* [21] telah melakukan perhitungan berdasarkan box model ganda di Muara Bangpakong, Thailand. Pola distribusi salinitas di muara Cisadane secara horisontal dan vertikal antara air tawar bersalinitas rendah terdapat di lapisan permukaan bergerak ke arah laut, sebaliknya bersalinitas tinggi yang terdapat di lapisan dekat dasar dari laut bergerak ke arah sungai berdasarkan laporan Hadikusumah [22]. Pola salinitas demikian didapatkan sama dengan di muara Sungai Angke Teluk Jakarta berdasarkan hasil penelitian Hadikusumah [23].

Tujuan penelitian adalah untuk memperoleh informasi oseanografi tentang karakteristik pelapisan parameter fisika dan kimia untuk menghitung budget air tawar, salinitas dan zat hara dengan menggunakan metode box model.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian telah dilakukan pada bulan Agustus 2005, di lokasi Delta Mahakam bagian selatan antara Bujur Timur 117.28°-117.33° E; Lintang Selatan antara -0.84°-0.92° S (Gambar 1 dan Tabel 1). Pengukuran parameter fisika (suhu, salinitas, transmisi cahaya, dan turbiditas) dengan menggunakan CTD Model 603 SBE. Pengukuran arus dan batimetri menggunakan ADCP Model RDI secara simultan berjumlah 13 stasiun. Pengukuran parameter kimia zat hara yaitu berdasarkan



Gambar 1. Peta dan Stasiun Penelitian di Selatan Delta Mahakam Bulan Agustus 2005

Tabel 1. Data Posisi Stasiun Penelitian Delta Mahakam Agustus 2005

No. Stasiun	Posisi Stasiun	
	Bujur Timur BT (°)	Lintang Selatan S (°)
1	117,31082	-0,84639
2	117,31052	-0,87083
3	117,29662	-0,8775
4	117,30692	-0,88389
5	117,31942	-0,88917
6	117,29862	-0,89472
7	117,30722	-0,90417
8	117,31252	-0,90833
1A	117,30892	-0,85139
2A	117,31082	-0,85833
4A	117,30942	-0,87528
7A	117,30612	-0,88972
1B	117,30610	-0,85111

contoh air yang diambil dengan menggunakan botol Nansen dari dua kedalaman untuk dianalisis kadar fosfat, nitrat, nitrit, ammonia dan silikat. Kemudian setelah sampel di saring dengan kertas saring Millipore size 0,45 µm, kadar fosfat, nitrat, nitrit, amoniak dan silikat dianalisis menurut metode Strickland & Parson [24] dengan menggunakan Spektrofotometer Shimadzu masing-masing pada panjang gelombang 885, 543, 680 dan 810 nm dalam satuan µmol. Sesuai dengan hasil penelitian air tawar, salinitas, dan zat hara di atas, maka box model yang akan digunakan adalah model dua lapisan (*two layer*).

Box model dianggap sebagai satu sistem yang digambarkan dalam dua lapisan permukaan (*upper*

*layer*) dan lapisan dasar (*lower layer*) menurut Gordon *et al.* [9] dalam Jacinto *et al.* [25] sebagaimana terlihat dalam persamaan:

$$0 = \sum input - \sum output \quad (1)$$

Budget air laut ( $V_D$  atau  $V_{deep}$ ) masuk (intrusi) ke lapisan dalam dan mengalir menuju lapisan permukaan dan keluar lagi dari permukaan. Pada lapisan permukaan budgetair permukaan yang keluar ( $V_{surf}$ ) dengan input air tawar ( $V_R$ ) mengalir menuju ke laut. Persamaan budgetair permukaan ( $V_{surf}$ ) adalah sebagai berikut:

$$V_{surf} = V_R - V_{deep} \quad (2)$$

dengan input air tawar ( $V_R$ ):

$$V_R = -(V_Q + V_P + V_G + V_O + V_E) \quad (3)$$

Maka keseimbangan air pada lapisan permukaan adalah:

$$V_{surf} + V_P + V_E + V_Q + V_G + V_O + V_{deep} = 0 \quad (4)$$

Dengan anggapan bahwa tidak ada budget air tawar yang membawa salinitas maka keseimbangan salinitas pada lapisan permukaan menjadi:

$$V_{surf} S_{syst-s} + V_{deep} S_{syst-d} + V_z (S_{syst-d} - S_{syst-s}) = 0 \quad (5)$$

Sedangkan keseimbangan salinitas pada lapisan dalam:

$$V_{deep} S_{ocn-d} - V_{deep} S_{syst-d} - V_z (S_{syst-d} - S_{syst-s}) = 0 \quad (6)$$

Dimana  $S_{syst-s}$  adalah salinitas sistem permukaan (*upper system*),  $S_{syst-d}$  adalah salinitas sistem lower/dasar,  $S_{ocn-d}$  adalah salinitas laut. Air laut ( $V_{deep}$ ) yang mengintrusi

lapisan dasar akan mengganti budget air permukaan yang keluar sistem:

$$V_{deep} = \frac{V_R S_{syst-s}}{S_{syst-s} - S_{ocn-d}} \quad (7)$$

Supaya air dalam sistem lapisan dasar dan permukaan tetap seimbang maka ada budgetair vertikal yang mengalami percampuran ( $V_Z$ ) antara lapisan permukaan dan dasar sebagai berikut:

$$V_Z = V_{deep} \left( \frac{S_{ocn-d} - S_{syst-d}}{S_{syst-d} - S_{syst-s}} \right) \quad (8)$$

Sedangkan untuk mencari *flushing time* ( $\tau_{syst}$ ) dapat menggunakan persamaan:

$$\tau_{syst} = \frac{V_{syst}}{(V_X + |V_R|)} \quad (9)$$

Dimana  $V_{syst}$  adalah volume sistem,  $V_X$  adalah sistem volume air laut dan  $V_R$  adalah sistem volume air tawar. Untuk mengkaji budget fosfat dan nitrat ialah berdasarkan kepada LOICZ (<http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/>) dan Smith *et al.* [26] dan Smith *et al.* [27]. Budget zat hara dalam suatu sistem *two-layer nutrient budget model* dapat dihitung dengan persamaan:

Untuk lapisan permukaan (*upper layer*):

$$d(VY_S)/dt = V_{QS} Y_{QS} + V_{GS} Y_{GS} + V_{OS} Y_{OS} + V_{PS} Y_{PS} + V_{ES} Y_{ES} + V_{RS} Y_{RS} + V_X (Y_{ocn-s} - Y_{sys-s}) + ^AY \quad (10)$$

Untuk lapisan dasar (*lower layer*):

$$d(VY_d)/dt = V_{Qd} Y_{Qd} + V_{Gd} Y_{Gd} + V_{Od} Y_{Od} + V_{Pd} Y_{Pd} + V_{Ed} Y_{Ed} + V_{Rd} Y_{Rd} + V_X (Y_{ocn-d} - Y_{sys-d}) + ^AY \quad (11)$$

Dimana  $Y$  adalah kadar zat hara. Komponen yang bernilai atau mendekati nol dapat dihilangkan, dan pada kondisi *steady state* persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

Untuk lapisan permukaan (*upper layer*)

$$^AY_S = -V_{QS} Y_{QS} - V_{GS} Y_{GS} + V_{OS} Y_{OS} + V_{RS} Y_{RS} + V_X (Y_{ocn-s} - Y_{sys-s}) \quad (12)$$

Untuk lapisan dasar (*upper layer*):

$$^AY_{sd} = -V_{Qd} Y_{Qd} - V_{Gd} Y_{Gd} + V_{Od} Y_{Od} + V_{Rd} Y_{Rd} + V_X (Y_{ocn-d} - Y_{sys-d}) \quad (13)$$

Menurut Boudreau [28] budget LOICZ secara luas dirancang untuk menggambarkan peran tingkatan

metabolisme sistem sebagai *source* atau *sink* dari N dan P. Sementara itu Swaney [29] menyatakan proses-proses yang terjadi di dalam sistem atau disebut juga metabolisme sistem bersih dapat diperoleh melalui 2 variabel dari  $\Delta DIP$  dan  $\Delta DIN$ . *Pertama*, produksi primer minus respirasi ( $p-r$ ) atau nama lainnya adalah metabolisme ekosistem bersih. ( $p-r$ ) didapatkan dari  $-(C:P)_{part} \times \Delta DIP$ . Boudreau [26] menambahkan jika nilai ( $p-r$ )  $>0$  maka sistem terdapat *sink* dari DIP ( $\Delta DIP <0$ ) sebaliknya jika ( $p-r$ )  $<0$  maka sistem terdapat *source* dari DIP ( $\Delta DIP >0$ ). *Kedua*, perbedaan antara fiksasi nitrogen dan denitrifikasi ( $nfix-denit$ ) dan dikalkulasikan sebagai  $\Delta DIN_{obs} - \Delta DIN_{exp}$ .  $\Delta DIN_{obs}$  adalah budget nonkonservatif pengamatan dan  $\Delta DIN_{exp}$  adalah budget yang diharapkan jika jalannya budget hanya berupa produksi atau konsumsi material organik dengan rasio N:P direpresentasikan oleh  $(N:P)_{part}$ . Boudreau [28] menambahkan jika nilai ( $nfix-denit$ )  $>0$  maka dalam sistem berlangsung proses fiksasi nitrogen sebaliknya jika nilai ( $nfix-denit$ )  $<0$  maka dalam sistem berlangsung proses denitrifikasi. Pada siklus nitrogen, denitrifikasi mengubah nitrat menjadi gas nitrogen sedangkan fiksasi nitrogen mengubah gas nitrogen menjadi nitrogen anorganik.

Menurut Gordon *et al.* [9] dalam Jacinto *et al.* [25] budget N dan P dapat digunakan untuk memperkirakan metabolisme sistem bersih yang direpresentasikan oleh metabolisme ekosistem bersih ( $p-r$ ) dan kinerja siklus nitrogen ( $nfix-denit$ ) dengan perhitungan perbandingan stoikiometri berdasar pada asumsi fitoplankton sebagai produser produktivitas primer. Rasio Redfield untuk C : N : P adalah 106 : 16 : 1.

Boudreau [28] menyatakan perbedaan antara produksi primer dan respirasi seringkali disebut “produksi ekosistem bersih atau *net ecosystem production*” (NEP) atau “metabolisme ekosistem bersih atau *net ecosystem metabolism*” (NEM), kedua istilah tersebut adalah sama. Untuk mencari nilai *net ecosystem metabolism* (NEM) atau metabolisme ekosistem bersih yang dilambangkan dengan ( $p-r$ ) yaitu:

$$(p-r) = -106 \Delta DIP \quad (14)$$

Boudreau [28] menambahkan jika nilai ( $p-r$ )  $>0$  maka sistem merupakan produser material organik (autotrofik) dimana terdapat *sink* dari DIP ( $\Delta DIP <0$ ) sebaliknya jika ( $p-r$ )  $<0$  maka sistem merupakan konsumen material organik (heterotrofik) dimana terdapat *source* dari DIP ( $\Delta DIP >0$ ). Dalam kinerja siklus nitrogen, fiksasi nitrogen dan denitrifikasi merupakan rangkaian penting budget nitrogen sehingga perbedaan ini digunakan sebagai ukuran fiksasi nitrogen minus denitrifikasi ( $nfix-denit$ ):

$$(nfix - denit) = \Delta DIN - 16 \Delta DIP \quad (15)$$

Boudreau [28] menambahkan jika nilai ( $nfix-denit$ )  $>0$  maka dalam sistem berlangsung proses fiksasi nitrogen

sebaliknya jika nilai ( $nfix-denit$ ) <0 maka dalam sistem berlangsung proses denitrifikasi. Pada siklus nitrogen, denitrifikasi mengubah nitrat menjadi gas nitrogen sedangkan fiksasi nitrogen mengubah gas nitrogen menjadi nitrogen organik. Reaksi tersebut memproduksi atau mengkonsumsi bentuk-bentuk nitrogen. Analisis budget ini akan membantu memahami peran kawasan pantai sebagai *source* atau *sink* dari nitrogen. Untuk menghitung parameter-parameter di atas, penulis telah membuat software sederhana dalam Mirosoft Excel.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran suhu di Delta Mahakam berkisar antara 28,72–29,68 °C. Distribusi tegak suhu di sepanjang garis tengah muara antara stasiun 1, 2, 4, dan 7 (Gambar 2A), mempunyai pola distribusi yang dipengaruhi oleh energi atau gaya eksternal dari aliran sungai maupun arus pasut. Suhu di lapisan permukaan dengan cepat menyerap energi panas dari sinar matahari, yang kemudian merambat ke bagian dasar. Suhu permukaan di stasiun 7 pada muara sebesar 29,68 °C, merambat dengan gradien suhu,  $dT/dZ = 0.356$  °Cm<sup>-1</sup> ke kedalaman 3 meter yang mempunyai suhu 28,79 °C. Aliran masa air memasuki muara dengan suhu berkisar antara 28,9–29,1°C, yang meningkat dari kedalaman 1,5 m ke lapisan dasar. Distribusi suhu dari utara muara ke bagian selatan muara merambat ke bagian dasar hingga mendekati lapisan dasar di stasiun 4.

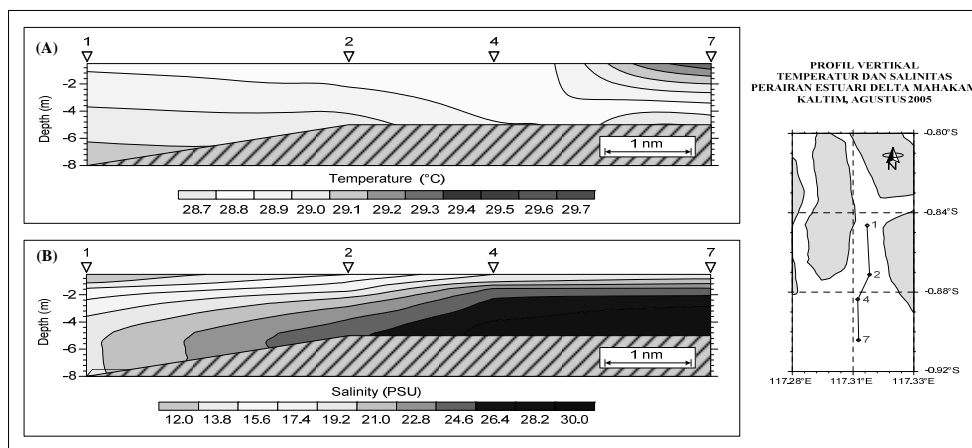
Salinitas sepanjang garis tengah muara (stasiun 1, 2, 4, dan 7) didapatkan berkisar antara 12,30–30,07 psu, dengan salinitas maksimum teramati di dekat lapisan dasar (stasiun 7) dan salinitas minimum teramati di lapisan permukaan (stasiun 1). Distribusi tegak salinitas di stasiun 7 berkisar antara 19,49-30,07 psu dengan kedalaman air mencapai 5 m. Penampang tegak distribusi salinitas ialah akibat pengaruh debit air sungai yang mengalir di lapisan permukaan, dan pengaruh air

laut akibat arus pasang surut yang masuk ke dalam sungai yang mengalir di lapisan dasar (Gambar 2B). Ketika pasang berlangsung massa air dari laut bersalinitas tinggi (30,07 psu) menyusup masuk ke muara (di kedalaman 4–5 m), sedangkan massa air bersalinitas rendah (2,039 psu) mengalir ke arah laut berada di lapisan permukaan (di kedalaman 1–4 m). Proses pergerakan air tawar dan salinitas di muara Mahakam hampir sama dengan di muara Sungai Cisadane oleh Hadikusumah [22] dan di muara Sungai Angke oleh Hadikusumah [23]

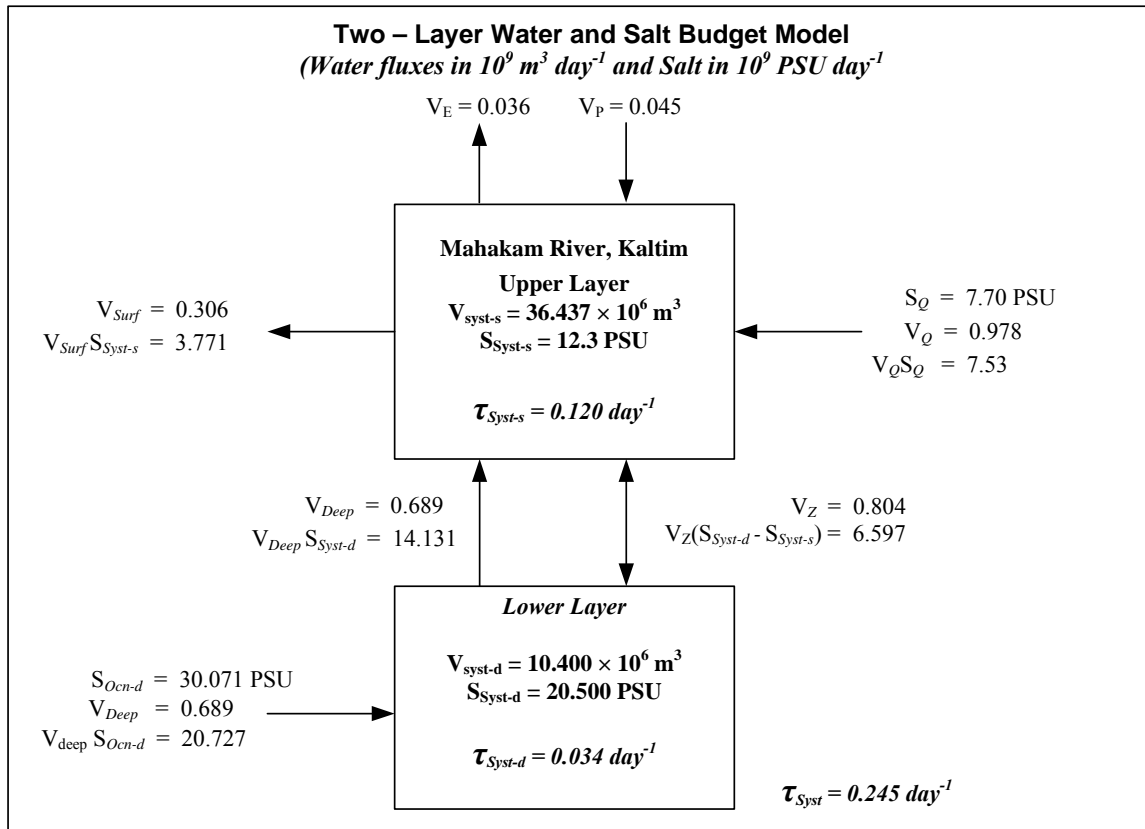
Perubahan salinitas terhadap kedalaman yang mendekati linearitas di stasiun 7 menunjukkan adanya stratifikasi yang baik antara massa air di lapisan permukaan dan lapisan dasar. Kondisi ini menyebabkan distribusi tegak salinitasnya ada di antara muara bagian utara dan bagian selatan (Gambar 2). Pada saat surut berlangsung, dalam kurun waktu ~6 jam, kondisi salinitas pada stasiun 1 hingga stasiun 7 di muara berubah menjadi air tawar (*freshwater*), dengan salinitas mendekati 0 psu, yang teramati pada stasiun 4 ketika mencapai surut terendah.

Hasil perhitungan budget air tawar dari dua lapisan di Delta Mahakam adalah sebagai berikut: Debit sungai ( $V_Q$ ) didapatkan sebesar  $0,978 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup>, volume dalam sistem lapisan permukaan ( $V_{Syst-s}$ ) didapatkan sebesar  $36,437 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, budget curah hujan ( $V_P$ ) didapatkan sebesar  $0,045 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup> dan budget evaporasi ( $V_E$ ) didapatkan sebesar  $0,036 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup>, maka budget air tawar yang keluar dari sistem atau menuju laut ( $V_{Surf}$ ) didapatkan sebesar  $0,0306 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup>. Budget air laut yang masuk dalam sistem di lapisan ke dua ( $V_{Deep}$ ) sebesar  $0,689 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup>, demikian pula budget yang naik dalam sistem lapisan permukaan yang sama didapatkan sebesar  $0,689 \times 10^9$  m<sup>3</sup>day<sup>-1</sup>.

Karena densitas di lapisan permukaan lebih rendah dibandingkan dengan densitas air di lapisan dasar,



Gambar 2. Penampang Tegak Distribusi Suhu (A) dan Salinitas (B)



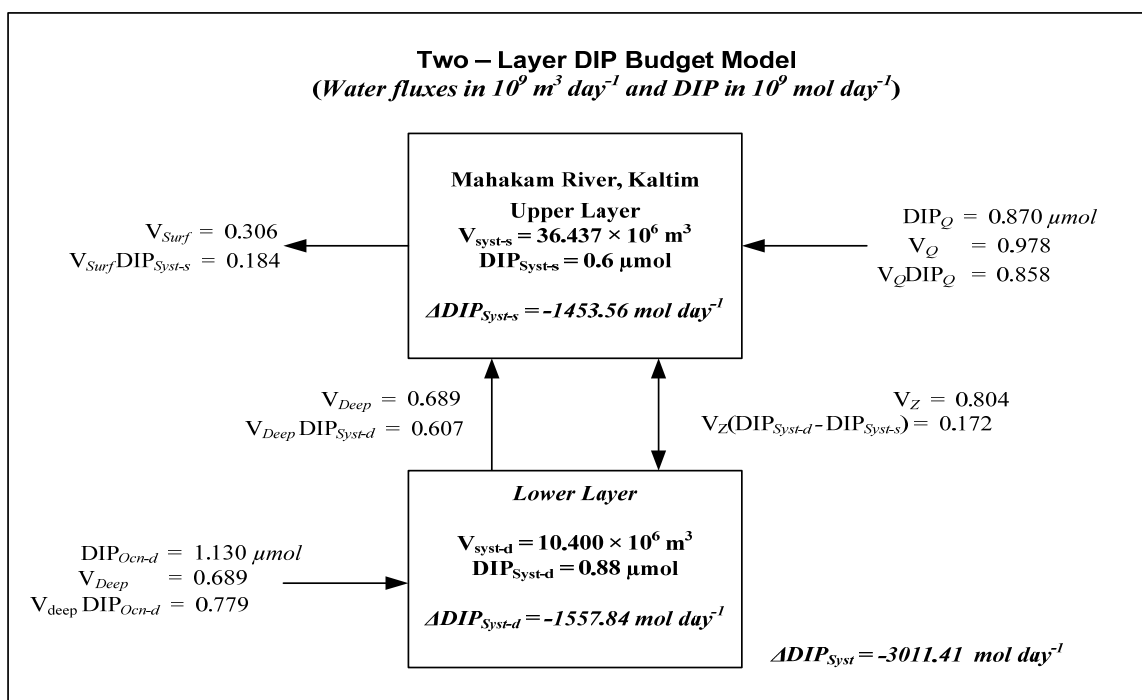
Gambar 3. Budget Massa Air Tawar dan Salinitas, di Muara Delta Mahakam Kalimantan Timur, Agustus 2005

Hasil perhitungan budget salinitas sungai ( $V_Q.S_Q$ ) didapatkan sebesar  $7,53 \times 10^9 \text{ psuday}^{-1}$ , dengan salinitas di lapisan permukaan ( $S_{\text{sys-t-s}}$ ) sebesar 12,3 psu, maka budget salinitas setelah keluar dari sistem lapisan permukaan ( $V_{\text{Surf}}.S_{\text{Sys-t-s}}$ ) didapatkan sebesar  $3,771 \times 10^9 \text{ psuday}^{-1}$ . Salinitas laut ( $S_{\text{Ocn-d}}$ ) sebesar 20,05 psu, maka budget salinitas air laut yang masuk dalam sistem lapisan dasar ( $V_{\text{Deep}}.S_{\text{Ocn-d}}$ ) didapatkan sebesar  $20,727 \times 10^9 \text{ psuday}^{-1}$ . Budget salinitas dalam proses pencampuran antara lapisan permukaan dan lapisan bawah ( $V_Z(S_{\text{Sys-t-d}} - S_{\text{Sys-t-s}})$ ) didapatkan sebesar  $6,597 \times 10^9 \text{ psuday}^{-1}$  (Gambar 3). Sebagai perbandingan hasil budget air permukaan di Fly River, Papua Guinea yang masuk dalam sistim ( $V_Q$ ) =  $90 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  dan air tawar dari sistem atau menuju ke laut ( $V_R$ ) sebesar  $90 \times 10^6 \text{ mday}^{-1}$  dan  $\tau = 13$  hari, dan nilai salinitas yang masuk dalam sistim atau ke arah darat sebesar  $1,755 \times 10^6 \text{ psum}^3 \text{ day}^{-1}$  dalam laporan Opdyke *et al.* [30].

Hasil analisa data fosfat inorganik terlarut (DIP) disajikan dalam Gambar 4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar DIP pada lapisan permukaan ( $\text{DIP}_Q$ ) sebesar  $0,870 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIP yang terbawa debit sungai ( $V_Q \text{DIP}_Q$ ) sebesar  $0,858 \mu\text{mol day}^{-1}$  diperoleh dari perkalian antara kadar DIP di sungai ( $\text{DIP}_Q$ ) dengan debit sungai ( $V_Q$ ) sebesar  $0,978 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ .

Budget DIP yang masuk ke sistem ( $\text{DIP}_{\text{sys-t-s}}$ ) berkurang kadarnya menjadi  $0,6 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIP yang berada dalam sistem sebesar  $-1453,56 \text{ molday}^{-1}$  dengan semakin berkurangnya  $V_{\text{surf}} \text{DIP}_{\text{sys-t-s}}$  dan debit sungai ( $V_{\text{surf}}$ ) yang keluar dari sistem masing-masing menjadi  $0,184 \text{ molday}^{-1}$  dan  $0,306 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar DIP pada kedalaman dekat dasar ( $\text{DIP}_{\text{ocn-d}}$ ) sebesar  $1,130 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIP dari laut ( $V_{\text{deep}} \text{DIP}_{\text{ocn-d}}$ ) sebesar  $0,779 \mu\text{mol}$  diperoleh dari perkalian antara kadar DIP di laut ( $\text{DIP}_{\text{ocn-d}}$ ) dengan budget air laut ( $V_{\text{deep}}$ ) sebesar  $0,689 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ . Budget DIP yang masuk ke sistem ( $\text{DIP}_{\text{sys-t-d}}$ ) berkurang kadarnya menjadi  $0,88 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIP yang berada dalam sistem ( $\text{DIP}_{\text{sys-t-d}}$ ) diperoleh sebesar  $-1557,84 \text{ molday}^{-1}$ . Juga terlihat semakin berkurangnya  $V_{\text{deep}} \text{DIP}_{\text{sys-t-d}}$  dan debit sungai ( $V_{\text{deep}}$ ) yang keluar dari sistem masing-masing menjadi  $0,607 \text{ molday}^{-1}$  dan  $0,689 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ . Pencampuran massa air di lapisan permukaan dan dasar sebesar  $0,804 \text{ moldays}^{-1}$  menghasilkan kadar DIP pada budget pencampuran  $V_Z(\text{DIP}_{\text{sys-t-d}} - \text{DIP}_{\text{sys-t-s}})$  sebesar  $0,172 \mu\text{mol}$  (Tabel 2 dan Gambar 4).

Kondisi ini menunjukkan bahwa Delta Mahakam di lapisan permukaan dan dasar berperan sebagai *sink* dari DIP karena sebagian dari DIP tertinggal di Delta Mahakam dengan selisih antara volume budget DIP



Gambar 4. Budget Fosfat Inorganik Terlarut (DIP) di muara Delta Mahakam Kalimantan Timur, Agustus 2005

yang berada dalam sistem,  $\Delta\text{DIP}$  di lapisan permukaan dan dasar masing-masing sebesar  $0,6 \mu\text{molDIPday}^{-1}$  dan  $0,88 \mu\text{molDIPday}^{-1}$  Sebagian dari budget DIP di ekspor keluar dari sistem di lapisan permukaan ( $V_{\text{surf}}\text{DIP}_{\text{system-s}}$ ) sebesar  $0,184 \mu\text{mol}$  dan dasar ( $V_{\text{deep}}\text{DIP}_{\text{system-d}}$ ) sebesar  $0,779 \mu\text{mol}$ .

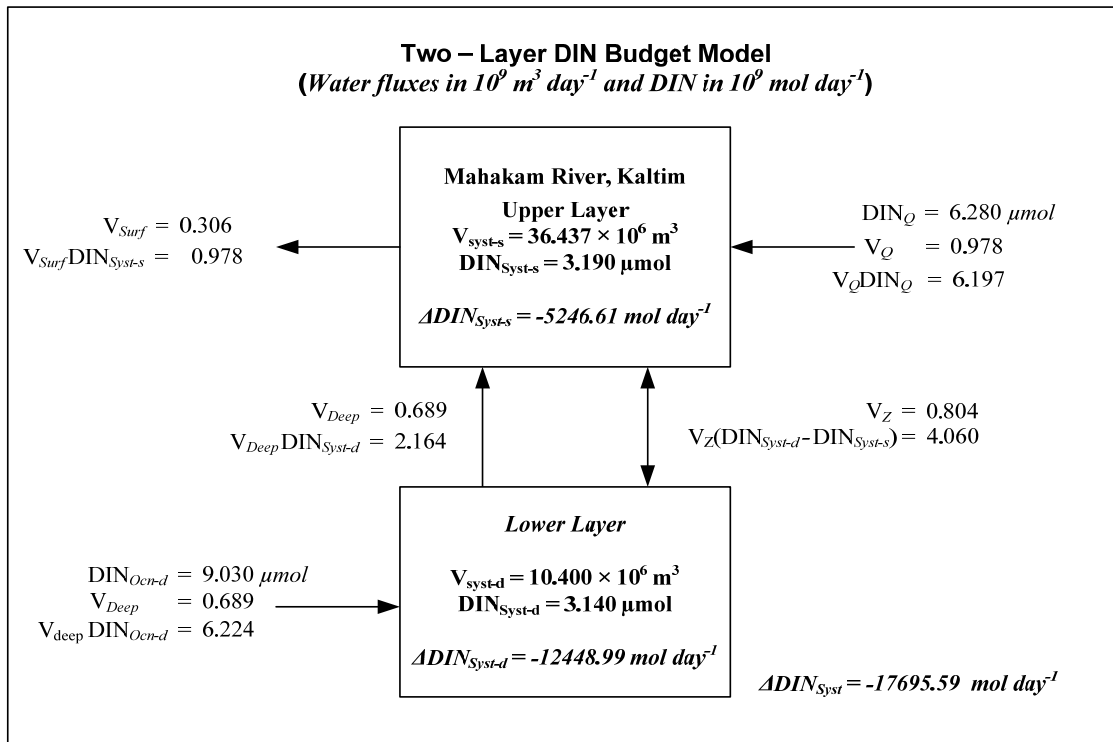
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar DIN di lapisan permukaan ( $\text{DIN}_Q$ ) didapatkan sebesar  $6,280 \mu\text{mol}$ , sedangkan budget DIN yang terbawa debit sungai ( $V_Q\text{DIN}_Q$ ) didapatkan sebesar  $6,197 \mu\text{mol day}^{-1}$ , maka perbandingan kadar DIN di sungai ( $\text{DIN}_Q$ ) dengan debit sungai ( $V_Q$ ) sebesar  $0,978 \text{ m}^3\text{day}^{-1}$ . Budget DIN yang masuk ke sistem ( $\text{DIN}_{\text{system-s}}$ ) berkurang kadarnya menjadi  $3,190 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIN yang berada dalam sistem didapatkan sebesar  $-5246,61 \text{ molday}^{-1}$  dengan semakin berkurangnya  $V_{\text{surf}}\text{DIN}_{\text{system-s}}$  dan debit sungai ( $V_{\text{surf}}$ ) yang keluar dari sistem masing-masing menjadi  $0,978 \text{ molday}^{-1}$  dan  $0,306 \times 10^9 \text{ m}^3\text{day}^{-1}$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar DIN pada kedalaman dekat dasar ( $\text{DIN}_{\text{ocn-d}}$ ) didapatkan sebesar  $9,030 \mu\text{mol}$ , adapun budget DIN dari laut ( $V_{\text{deep}}\text{DIN}_{\text{ocn-d}}$ ) didapatkan sebesar  $6,224 \mu\text{mol}$  diperoleh dari perkalian antara kadar DIN di laut ( $\text{DIN}_{\text{ocn-d}}$ ) dengan budget air laut ( $V_{\text{deep}}$ ) didapatkan sebesar  $0,689 \text{ m}^3\text{day}^{-1}$ . Budget DIN yang masuk ke sistem ( $\text{DIN}_{\text{system-d}}$ ) berkurang kadarnya menjadi  $3,140 \mu\text{mol}$  sedangkan budget DIN yang berada dalam sistem pada lapisan permukaan ( $\Delta\text{DIN}_{\text{system-s}}$ ) dan dasar ( $\Delta\text{DIN}_{\text{system-d}}$ ) masing-masing didapatkan sebesar  $-5246,61 \text{ mol day}^{-1}$  dan  $-12448,99 \text{ molday}^{-1}$ . Terlihat semakin berkurangnya  $V_{\text{deep}}\text{DIP}_{\text{system-d}}$

Tabel 2. Hasil Perhitungan Budget DIP dan DIN, Metabolisme dan Siklus Nitrogen di Delta Mahakam, Agustus 2005

Material non - conservative	Lapisan	
	Permukaan	Dasar
$\Delta\text{DIP} (\text{molday}^{-1})$	-1453,56	-1557,84
$\Delta\text{DIN} (\text{molday}^{-1})$	-5246,61	-12448,99
(p-r) ( $\text{molday}^{-1}$ )	-470,784	319,209
(nfix – denit) ( $\mu\text{mol day}^{-1}$ )	30,486	44,964
Kondisi	Autotrophic Denitrification	Heterotrophic N fixation

dan debit sungai ( $V_{\text{deep}}$ ) yang keluar dari sistem masing-masing menjadi  $0,607 \text{ molday}^{-1}$  dan  $0,689 \times 10^9 \text{ m}^3\text{day}^{-1}$ .

Percampuran massa air di lapisan permukaan dan dasar didapatkan sebesar  $0,804 \text{ moldays}^{-1}$  menghasilkan kadar DIN pada budget percampuran  $V_Z(\text{DIN}_{\text{system-d}} - \text{DIN}_{\text{system-s}})$  didapatkan sebesar  $4,060 \mu\text{mol}$ . Kondisi ini menunjukkan bahwa Delta Mahakam di lapisan permukaan dan dasar berperan sebagai *sink* dari DIN karena sebagian dari DIN tertinggal di Delta Mahakam dengan selisih antara volume budget DIN yang berada dalam sistem,  $\Delta\text{DIN}$  di lapisan permukaan dan dasar masing-masing didapatkan sebesar  $3,190 \mu\text{molDINday}^{-1}$  dan  $3,140 \mu\text{molDINday}^{-1}$ . Sebagian dari budget DIN di ekspor keluar dari sistem di lapisan permukaan ( $V_{\text{surf}}\text{DIP}_{\text{system-s}}$ ) sebesar  $0,978 \mu\text{mol}$  dan dasar ( $V_{\text{deep}}\text{DIP}_{\text{system-d}}$ ) sebesar  $2,164 \mu\text{mol}$  (Tabel 2 dan Gambar 5).



Gambar 5. Budget Nitrogen Inorganik Terlarut (DIN) di muara Delta Mahakam Kalimantan Timur, Agustus 2005

Dengan menggunakan *Stoikiometri* rasio C : N : P (*particulate*) Redfield, maka dapat diperkirakan metabolisme bersih sistem yang direpresentasikan oleh selisih laju fotosintetis dan respirasi (p-r) dan kinerja siklus nitrogen dalam proses fiksasi dan denitrifikasi (nfix-denit) dengan asumsi, nilai  $\hat{\text{DIP}}$  dan  $\hat{\text{DIN}}$  dapat dijadikan dasar untuk melihat kinerja biogeokimiawi dari Delta Mahakam ini sebagai suatu sistem (Tabel 2).

Hasil perhitungan mengindikasikan bahwa Delta Mahakam di lapisan permukaan merupakan perairan dengan metabolisme yang bersifat autotrofik karena laju fotosintetis melebihi laju respirasi sebesar  $+319,209 \text{ molday}^{-1}$ . Sedangkan pada kedalaman dekat dasar adalah metabolisme yang bersifat heterotrofik karena laju respirasi melebihi laju fotosintetis sebesar  $-470,784 \text{ molday}^{-1}$ . Proses autotrofik yang menyebabkan terjadinya fiksasi nitrogen dari atmosfer diperoleh di lapisan permukaan dengan surplus produksi bahan organik sebesar  $+30,486 \text{ molday}^{-1}$  dan laju fiksasi nitrogen yang melebihi laju denitrifikasi dengan nilai  $44,964 \text{ molday}^{-1}$ . Sedangkan di kedalaman dekat dasar terjadi proses metabolisme yang bersifat heterotrofik yang menyebabkan terjadinya proses denitrifikasi.

**4. Simpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut: Distribusi vertikal salinitas di Delta Mahakam didapatkan mempunyai stratifikasi

yang tinggi (*highly stratified*), dimana air tawar bersalinitas 12,30 psu mengalir di lapisan permukaan sungai ke arah laut, dan air laut bersalinitas tinggi 30,07 psu mengalir masuk ke arah sungai berada di lapisan dasar delta yang dipisahkan oleh lapisan percampuran (*mixing layer*). Budget air tawar yang menuju laut ( $V_{Surf}$ ) sebesar  $0,0306 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , dan budget salinitas air laut yang masuk dalam sistem lapisan dasar ( $V_{deep} \cdot S_{ocn-d}$ ) sebesar  $20,727 \times 10^9 \text{ psuday}^{-1}$ . Sedangkan waktu pengenceran ( $\tau_{syst}$ ) sebesar  $0,245 \text{ day}^{-1}$  atau 5,87 jam, dan ini sesuai dengan jenis pasang surut semidiurnal. Budget zat hara pada lapisan permukaan di Delta Mahakam, Kalimantan Timur didapatkan bersifat autotrofik sedangkan di lapisan dekat dasar cenderung bersifat heterotrofik. Budget zat hara pada lapisan permukaan dalam suatu sistem *two-layer nutrient budget model* dengan laju budget zat hara melebihi laju budget keluarnya maka sistem cenderung bersifat autotrofik dimana siklus nitrogen dicirikan dengan fiksasi nitrogen dari atmosfer sedangkan pada kedalaman dekat dasar bersifat heterotrofik dengan siklus nitrogen yang dicirikan dengan denitrifikasi dimana laju budget zat hara melebihi laju budget masuknya.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini, terutama kepada: Prof. Dr. Jan



Sopaheluwakan, M.Sc., sebagai Koordinator Sub Program Kalimantan Timur dan Bangka Belitung, Program Kompetitif Pengembangan IPTEK-LIPI 2005; Dr. Ir. Rudi Subagja sebagai Koordinator Harian; Dr. Suharsono sebagai Kapus Oseanografi dan Drs. Muswerry Muchtar M.Sc, APU selaku Koordinator Proyek Penelitian di Perairan Delta Mahakam Kalimantan Timur yang telah banyak membantu untuk kelancaran program.

### Daftar Acuan

- [1] A.S. Sidik, Presented at the Rescopar Scientific Meeting in Mulawarman University, Samarinda, Indonesia, 2009.
- [2] A.B. Duxbury, A.C. Duxbury, K.A. Sverdrup, *Fundamental of Oceanography*. 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Companies, Inc, New York, 2002, p.158.
- [3] B.W. Pipkin, D.S. Gorsline, R.E. Casey, D.E. Hammond, *Laboratory Exercise in Oceanography*, 2<sup>nd</sup> Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 1987, p.257.
- [4] S.S.L. Hettiarachchi, *Ocean and Coastal Management* 34/1 (1997) 29.
- [5] B. Triatmodjo, *Teknik Pantai*, Beta Offset, Yogyakarta, 1999, p.397.
- [6] Hadikusumah, J.D. Lekalet, In: Ruyitno, A. Syahailatua, M. Muchtar, Pramudji, Sulistijo, T. Susana (Eds.), *Pengaruh Arus terhadap Stratifikasi Massa Air di Muara Cisadane, Ekosistem Muara Cisadane*, Puslit Oseanografi, LIPI, 2008, p.71.
- [7] I.H. Supriadi, *Oseana* 26/4 (2001) 1.
- [8] A.B. Sutomo, Hadikusumah, Q. Adnan, M. Simanjuntak, *Lingkungan dan Pembangunan, Environment and Development* 21/2 (2001) 91.
- [9] D.C. Gordon, Jr., P.R. Boudreau, K.H. Mann, J.E. Ong, W.L. Silvert, S.V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff, T. Yanagi, *Biogeochemical Modelling Guidelines, LOICZ Report & Studies No.5*, Texel, The Netherlands, 1996, p.96.
- [10] S.V. Smith, C.J. Crooland, *Australian Estuarine System: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes, LOICZ Report & Studies No.12*, Texel, The Netherlands, 1999, p.182.
- [11] V. Dupra, *Manukau Harbour, North Island, LOICZ Report & Studies No.12*, Texel, The Netherlands 1999, p.98.
- [12] Anon., *Laporan Akhir Penelitian Ekosistem Perairan Estuaria Cisadane*, P2O-LIPI, Jakarta, 2005, p.82.
- [13] Hadikusumah, *Box Model Budget Air Tawar dan Salinitas di Estuari Cisadane. Ekosistem Estuari Cisadane*, In: Ruyitno, A. Syahailatua, M. Muchtar, Pramudji, Sulistijo, T. Susana (Eds.), *Puslit Oseanografi*, LIPI, Jakarta, 2008, p.57.
- [14] Anon., *Laporan Akhir Studi Dinamika Selat Makassar Serta Interaksinya dengan Daratan P. Kalimantan dan P. Sulawesi*, Program Kompetitif Kalimantan Timur dan Bangka-Belitung, P2O, LIPI, 2005.
- [15] N. Mahmood, S.R. Chowdhury, A.S.M. Sharif, M.M. Uddin, M.S. Ullah, *Water, Nutrient and Sediment Flux Study through the Lower Meghna River Estuary (Hatiya Channel)*, In: *Final Report for APN Project: An Assessment of Nutrient, Sediment and Carbon Fluxes to the Coastal Zone in South Asia and their Relationship to Human Activities*, Sri Lanka National Committee of IGBP, Sri Lanka Association for the Advancement of Science, 2004, p.359.
- [16] V. Meghana, Bapardekar, S.N. de Sousa, M.D. Zingde, *Biogeochemical Budgets for Tapi Estuary*. In: *Final Report for APN Project: An Assessment of Nutrient, Sediment and Carbon Fluxes to the Coastal Zone in South Asia and their Relationship to Human Activities*. Sri Lanka National Committee of IGBP; Sri Lanka Association for the Advancement of Science, 2004, p.359.
- [17] A.I.M. Danish, A.R. Tabrez, A. Siddiqui, S. Rehman, R. Haq, *Nutrient Budget calculated for the Indus River and Delta System*. In: *Final Report for APN Project: An Assessment of Nutrient, Sediment and Carbon Fluxes to the Coastal Zone in South Asia and their Relationship to Human Activities*. Sri Lanka National Committee of IGBP; Sri Lanka Association for the Advancement of Science, 2004, p.359.
- [18] S.P. Samarawickrama, S.S.L. Hettiarachchi, *An Assessment of Nutrient Budgets of Lunawa Lagoon, Sri Lanka*, In: *Final Report for APN Project: An Assessment of Nutrient, Sediment and Carbon Fluxes to the Coastal Zone in South Asia and their Relationship to Human Activities*, Sri Lanka National Committee of IGBP, Sri Lanka Association for the Advancement of Science, 2004, p.359.
- [19] S.M. Liu, G.H. Hong, X.W. Ye, J. Zhang, X.L. Jiang, *Biogeosciences Discuss*. 6 (2009) 391.
- [20] B. Lambert, *Micropaleontological Investigations in the Modern Mahakam Delta, East Kalimantan (Indonesia)*, *Carnets de Géologie/Notebooks on Geology, Maintenon, Article 2003/02 (CG2003\_A02\_BL)*, 2002.
- [21] T. Boonphakdee, T. Fujiwara, *Environment Asia* 1 (2008) 7.
- [22] Hadikusumah, *J. Makara Seri Sains* 12 (2008) 83.
- [23] Hadikusumah, In: Ruyitno, M. Muchtar, Pramudji, Sulistijo, T. Susana dan Fahmi (Eds.), *Percampuran Massa Air Akibat Pengaruh Daratan dan Musiman di Teluk Jakarta*. Puslit Oseanografi, LIPI, Jakarta, 2010, p.51.
- [24] J.D.H. Strickland, T.R. Parsons, *Fish. Res. Board. Canada, Bull.* 167 (1968) 1.
- [25] G.S. Jacinto, *Manila Bay, Luzon Island*, In: S.V. Smith, V. Dupra, *Estuarine Systems of the South*

- China Sea Region: Carbon, Nitrogen and Phosphorous Fluxes, LOICZ Core Project of the IGBP, Texel, The Netherland, 2000, p.35.
- [26] S.V. Smith, C.J. Crossland, Australian Estuarine Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphors Fluxes, LOICZ Report & Studies No.12, Texel, The Netherland, 1999, p.182.
- [27] S.V. Smith, V. Dupra, J.I. Marshall Crossland, C.J. Crossland, Estuarine Systems of the South China Sea Region: Carbon, Nitrogen and Phosphors Fluxes, UNEP, LOICZ Report & Studies No.13, Texel, The Netherland, 2000, p.115.
- [28] P.R. Boudreau, Stoichiometric Analysis of CNP Budgets. <http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/stoich.htm>, 2006.
- [29] Swaney, D.P. 2000. Rules of Thumb in Coastal Nutrient Budgets: General Notes. <http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/rot/thumb.htm>, 2006.
- [30] B.N. Opdyke, A. Suzuki, P. Davies, G. Brunskill, In: S.V. Smith, C.J. Crossland (Eds.), Fly River, Budgets for Papua New Guinea Estuarine System, Australian Estuarine Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes, LOICZ Report & Studies No.12, Texel, The Netherland, 1999, p.182.