

**STUDI AWAL PENGUKURAN SISTEM CO<sub>2</sub> DI TELUK BANTEN**  
**PRELIMINARY RESULT OF CO<sub>2</sub> SYSTEM MEASUREMENT IN BANTEN BAY**

Novi Susetyo Adi<sup>1)</sup> dan Agustin Rustam<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Badan Riset Kelautan dan Perikanan, Departemen Kelautan dan Perikanan.  
Email: novi\_marineoptics@yahoo.com; sriagustintrustam@yahoo.com

**Abstract**

*CO<sub>2</sub> flux exchange between ocean and atmosphere is an important aspect in ocean carbon cycle. Long-term seasonal measurement of this aspect is required to explain the variability of air-sea CO<sub>2</sub> exchange overtime. This article presents preliminary result of CO<sub>2</sub> system measurement in Banten bay for July and August 2009 periods. The study sites cover low to high salinity waters. The main objective of this research is to find out the variability of CO<sub>2</sub> parameters in the study area which include dissolved inorganic carbon (DIC), pH, alkalinity and partial pressure of CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>). Those parameters are measured in situ and or in laboratory through monthly water sampling activity. pCO<sub>2</sub> is indirectly calculated from DIC and pH employing GEOSECS model available in CO2SYS software. In general, pH and alkalinity measurement result shows slight difference in range of values along the transect line and between the two months. For the two months riverine and estuary waters tend to have higher concentration of DIC and pCO<sub>2</sub> compared to seaward sites probably due to upland inputs and anthropogenic sources. Subtraction of global pCO<sub>2atmosphere</sub> value of IPCC (385  $\mu$ atm) from pCO<sub>2water</sub> (termed as differential pCO<sub>2</sub>) reveals that for the two months riverine and estuary waters act as sources of CO<sub>2</sub> to the atmosphere whereas higher salinity waters shows more variability in term of sink and source to atmospheric CO<sub>2</sub>. Simple linear regression analysis applied to pCO<sub>2</sub> data and 5 parameters (DIC, pH, Alk, temperature and chlorophyll) indicates that in July temperature is the dominant controlling factor for pCO<sub>2</sub> whereas it is chlorophyll which determines the variability of pCO<sub>2</sub> in August.*

**Keywords:** CO<sub>2</sub> System, pCO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> Sink and Source

**Abstrak**

Untuk mengetahui variabilitas pertukaran CO<sub>2</sub> antara laut dan atmosfer diperlukan pengukuran sistem CO<sub>2</sub> secara jangka panjang mencakup berbagai musim. Penelitian ini menampilkan hasil awal pengukuran sistem CO<sub>2</sub> di Teluk Banten pada bulan Juli dan Agustus 2009. Lokasi studi mencakup perairan bersalinitas rendah (sungai) hingga tinggi (laut Jawa). Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengkaji variabilitas sistem CO<sub>2</sub> di Teluk Banten yang meliputi karbon anorganik terlarut, pH, alkalinitas dan pCO<sub>2</sub> (tekanan parsial CO<sub>2</sub>). Metode yang digunakan adalah pengukuran sistem CO<sub>2</sub> perairan secara *in situ* dan atau laboratorium melalui aktivitas *sampling* air bulanan. pCO<sub>2</sub> dihitung secara tidak langsung dari pH dan DIC menggunakan model GEOSECS di dalam perangkat lunak CO2SYS. Hasil menunjukkan pH dan alkalinitas mempunyai perbedaan nilai kecil sepanjang transek dan antara Juli dan Agustus. Perairan sungai cenderung mempunyai kandungan DIC dan pCO<sub>2</sub> lebih tinggi dibanding stasiun lainnya. Perbandingan nilai pCO<sub>2</sub> perairan dengan nilai pCO<sub>2</sub> atmosfer dari IPCC, yaitu 385  $\mu$ atm menunjukkan bahwa pada bulan Juli dan Agustus perairan sungai berperan sebagai pelepas CO<sub>2</sub> ke atmosfer, sedangkan perairan bersalinitas tinggi berperan sebagai *sink* maupun *source* bagi CO<sub>2</sub> atmosfer. Hasil analisa statistik regresi linear antara pCO<sub>2</sub> dengan 5 parameter CO<sub>2</sub> (DIC, pH, Alk, suhu, klorofil) dan dengan parameter suhu, klorofil dan DO menunjukkan bahwa pada bulan Juli pCO<sub>2</sub> di wilayah studi dipengaruhi oleh suhu, sedangkan pada bulan Agustus pCO<sub>2</sub> utamanya dipengaruhi oleh klorofil dengan pengaruh tambahan dari suhu.

**Kata Kunci :** Sistem CO<sub>2</sub>, pCO<sub>2</sub>, penyerap dan pelepas CO<sub>2</sub>

## 1. Pendahuluan

CO<sub>2</sub> adalah salah satu gas rumah kaca penyebab utama pemanasan global yang mengakibatkan dampak perubahan iklim yang telah terjadi di berbagai belahan dunia: kekeringan dan kebakaran hutan, naiknya muka air laut dan meningkatnya intensitas dan periode hujan yang berakibat banjir. Bumi sebenarnya telah dilengkapi dengan penyerap CO<sub>2</sub> alami yaitu atmosfer, daratan dan lautan. Namun penebangan hutan yang marak mengakibatkan stok karbon yang tersimpan di dalam vegetasi menjadi terlepas ke atmosfer dan menurunkan kemampuan alami daratan dalam menyerap CO<sub>2</sub> sehingga perhatian mulai ditujukan ke laut. Laut adalah penyerap CO<sub>2</sub> alami (*natural CO<sub>2</sub> sink*) terbesar di bumi (Raven and Falkowski, 1999), dimana CO<sub>2</sub> dapat larut di dalam air atau dimanfaatkan oleh fitoplankton menjadi biomassa melalui proses fotosintesa. Namun angka penyerapan CO<sub>2</sub> oleh laut masih bervariasi dan menjadi penelitian intensif. Sabine *et.al.* (2004) menyatakan kemampuan laut hingga 48 % dalam menyerap CO<sub>2</sub>. Penelitian lain menyebutkan dari total 4 – 5 Pg C emisi tiap tahun ke atmosfer, sekitar 2 Pg C diserap laut, yang ± setara dengan 50 %-nya (Cai *et.al.*, 2006). Hasil lain menyebutkan sekitar 90 Gigaton (Gt) karbon / tahun dilepaskan dari permukaan lautan di seluruh dunia, sementara penyerapan tahunan oleh lautan sebesar 92 Gt, sehingga terdapat penyerapan bersih CO<sub>2</sub> oleh laut sekitar 2 Gt setiap tahunnya (Fletcher *et.al.*, 2006).

Penelitian mengenai peran laut sebagai penyerap CO<sub>2</sub> umumnya dilakukan di perairan laut lepas di wilayah lintang tinggi karena faktor volume air yang besar, suhu rendah, tidak adanya stratifikasi termoklin dan aktivitas biologi yang tinggi untuk kepentingan penyerapan dan penyimpanan alami CO<sub>2</sub>. Laut yang berperan sebagai *oceanic sink* terbesar untuk CO<sub>2</sub> adalah laut Selatan (*Southern Ocean*) (Moore *et.al.*, 2000) dan laut Atlantik (Chierici *et.al.*, 2009). Suhu rendah meningkatkan kelarutan CO<sub>2</sub> dan menurunkan pCO<sub>2</sub> perairan sehingga terjadi aliran penyerapan CO<sub>2</sub> dari atmosfer ke laut. Suhu homogen (tidak terstratifikasi secara vertikal) mengakibatkan CO<sub>2</sub> di permukaan dapat tertransfer dan tersimpan ke dasar laut.

Perairan pesisir juga berperan penting terhadap total *budget* karbon global karena menerima aliran karbon dan nutrien dari darat dan ekosistem lahan basah walaupun total luasannya lebih kecil dibandingkan laut lepas. Kemampuan ini didukung dengan adanya transpor materi dan energi dengan laut lepas melalui *continental slope* yang menjadikannya salah satu wilayah yang proses biogeokimianya paling aktif. Milliman and Syvitski (1992) menyebutkan bahwa sebanyak 0,25 – 0,4 x 10<sup>5</sup> g karbon organik terlarut dilepaskan ke laut dari sungai ke perairan pesisir setiap tahunnya. Pertukaran CO<sub>2</sub> antara atmosfer dan perairan pesisir juga terjadi cukup intensif dan mempengaruhi fluks CO<sub>2</sub> pada skala regional maupun global (Borges *et.al.*, 2005).

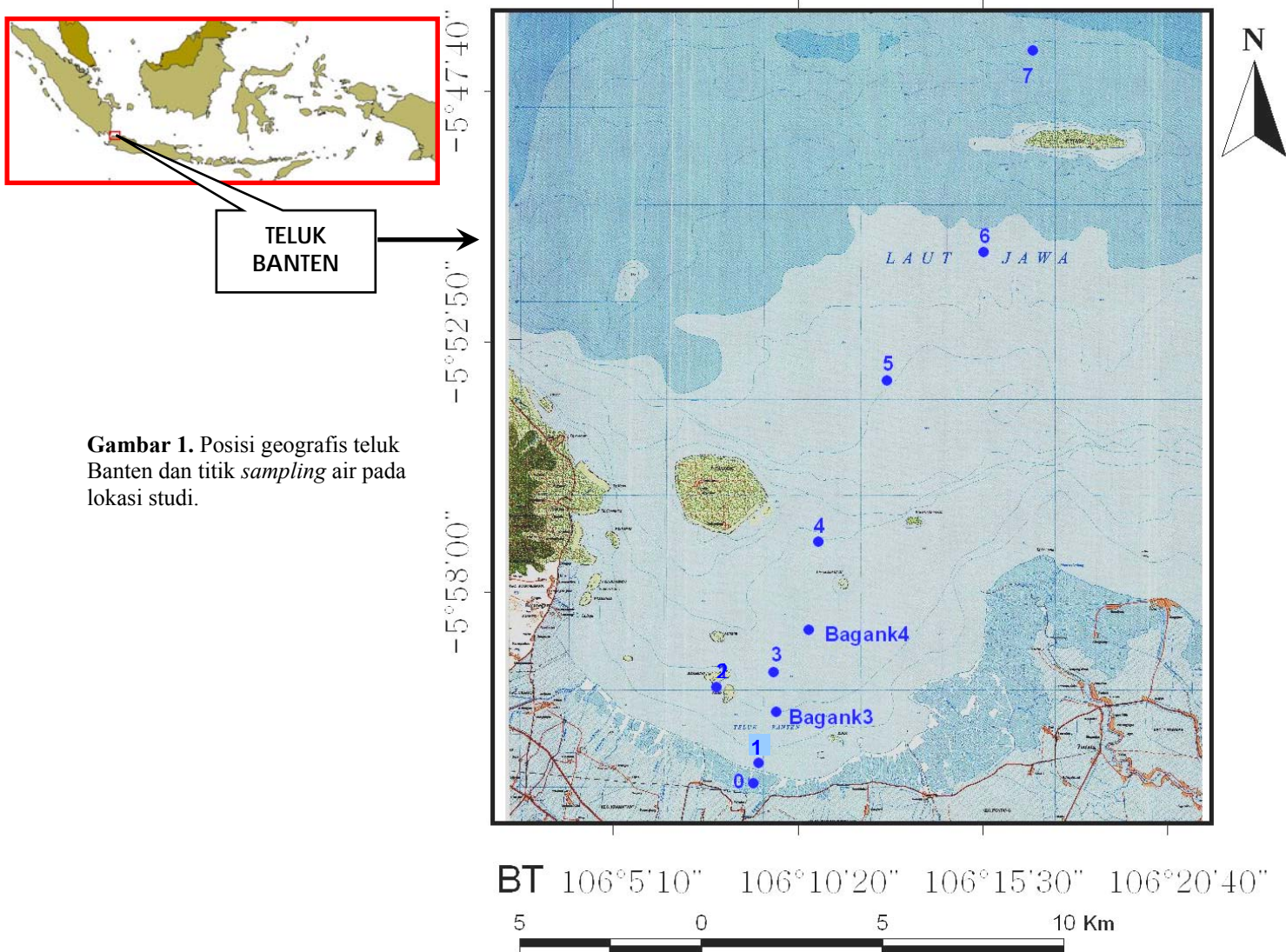
Perairan Indonesia seluas 17% dari total wilayah laut dunia juga berpotensi menyerap CO<sub>2</sub> karena mempunyai produktivitas primer tinggi (Behrenfeld *et.al.*, 2005), wilayah *upwelling* yang luas (Kunarso *dkk.*, 2009; Lefevre *et.al.*, 2002) dan *continental shelf* (Tsunogai *et.al.*, 1999). Selain faktor-faktor tersebut, tingginya curah hujan juga akan membawa fluks sedimen sumber materi karbonat ke perairan pesisir melalui sungai-sungai. Wilayah pesisir Utara Propinsi Banten terbentuk sebagai hasil interaksi kekuatan-kekuatan asal laut dan darat yang bersifat dinamis. Keadaan tersebut tercermin dari adanya segmen-segmen pantai yang erosional, akresi dan stabil; dan dalam 100 tahun terakhir telah terjadi perubahan besar di kawasan tersebut yang dipicu oleh aktivitas manusia. Pemindahan muara sungai dari Tanjung Pontang ke kawasan

Tengkurak, misalnya, telah menyebabkan perubahan karakter pantai dari kedua kawasan tersebut. Kawasan Tanjung pontang yang semula bersifat ekspansif atau akresi, berubah menjadi erosional; sedangkan kawasan Tengkurak yang semula relatif stabil, berubah menjadi ekspansif atau akresi (Setyawan *dkk*, 2003). Selain itu aktivitas manusia di daratan pesisir Utara Banten telah menyebabkan masuknya berbagai bahan pencemar ke perairan pesisir. Perubahan morfologi pantai dan dinamika di wilayah hulu ditambah dengan aktivitas manusia tersebut akan berpengaruh terhadap dinamika sistem CO<sub>2</sub> wilayah pesisir Banten, termasuk Teluk Banten sehingga diperlukan suatu studi yang komprehensif mengenai distribusi dan kuantitas sistem CO<sub>2</sub> di Teluk Banten.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji variabilitas sistem CO<sub>2</sub>, terutama DIC, pH, alkalinitas dan pCO<sub>2</sub> di teluk Banten. Sebagai hasil awal dari penelitian jangka panjang yang sedang berlangsung, penelitian ini diharapkan memberikan indikasi awal variabilitas sistem CO<sub>2</sub> di teluk Banten.

## 2. Materi dan Metoda

### 2. Gambaran Umum Wilayah Studi



**Gambar 1.** Posisi geografis teluk Banten dan titik *sampling* air pada lokasi studi.

Teluk Banten terletak di ujung Barat dan pantai utara pulau Jawa dengan luas kurang lebih 120 km<sup>2</sup> dan tersebar beberapa pulau di dalamnya. Pulau terbesar yang berpenghuni adalah pulau Panjang yang berada di sebelah Barat mulut teluk. Pulau lain yang berpenghuni adalah pulau Tunda yang terletak di sebelah Timur ke arah ujung luar Utara teluk Banten dan telah masuk dalam wilayah perairan Laut Jawa (**Gambar 1**). Beberapa sungai besar dan kecil bermuara di Teluk Banten, diantaranya sungai Domas, Soge, Cikemayungan, Banten, Pelabuhan, Wadas, Baros, Ciujung, Anyar, Cilid, Kesuban, Baru, Serdang, Suban, Kedungingus dan Candi (Peta Lingkungan Pantai Indonesia, Lembar LPI 1110-09 Teluk Banten, 1999). Sungai terbesar adalah Ciujung dan Anyar (Peta Lingkungan Pantai Indonesia, Lembar LPI 1110-09 Teluk Banten, 1999). Lamun (*seagrass*) dapat ditemukan di beberapa tempat, antara lain sepanjang pantai bagian Barat teluk, paparan terumbu beberapa pulau karang (pulau Panjang, Tarahan, Lima, Kambing, Pamujan Besar dan Kepuh) dan pada daerah terumbu karang intertidal hingga kedalaman 6 meter.

Kedalaman teluk berkisar antara 1 – 10 meter dari muara hingga mendekati ujung teluk, sedangkan kedalaman ujung teluk hingga pulau Tunda dapat mencapai 40 – 60 meter. Sedimen teluk Banten terdiri dari lumpur dan pasir (Green and Short, 2003), nilai salinitas bervariasi antara 28.23 – 35,34 psu (Green and Short, 2003). Musim penghujan berlangsung antara November hingga Maret dan musim kemarau antara April – Oktober. Bakau dapat ditemukan di sepanjang Grenyang, bagian Timur teluk, hingga ke Tanjung Pontang di sebelah Barat Teluk, dan juga di sebelah Selatan pulau Panjang.

## 2.2. Sampling dan Preparasi Sampel

Sampling air dilakukan secara bulanan (sekali tiap bulan) sejak bulan Juni 2009 selama 12 bulan berikutnya untuk dapat menganalisis variabilitas musiman sistem CO<sub>2</sub> di Teluk Banten. Parameter sistem CO<sub>2</sub> yang diukur adalah DIC, pH dan alkalinitas. Pengukuran juga dilakukan untuk klorofil, produktivitas primer, kedalaman *sechii disk*, DO (*dissolved oxygen* / oksigen terlarut) dan suhu. pH diukur dua kali, yaitu secara *in situ* menggunakan alat multiparameter DKK TOA dan di laboratorium menggunakan pH meter tipe Metrohm 691. Produktivitas primer diukur menggunakan prinsip pengukuran DO pada botol gelap-terang di stasiun ‘bagank 3’ dan ‘bagank 4’ (**Gambar 1**). Pengukuran DO dan suhu perairan dilakukan *in situ* menggunakan alat multiparameter DKK TOA. *Sechii disk* diukur *in situ* menggunakan lempengan papan yang dicat hitam dan putih dan kemudian diberi tali dan pemberat.



**Gambar 2.** Peralatan yang digunakan untuk survei lapangan. Keterangan : 1 = multiparameter DKK TOA (pH, suhu, DO, salinitas, klorofil & tss *in situ*), 2 = *vacuum pump* untuk menyaring sampel, 3 = peta citra berkoordinat yang mencantumkan posisi titik sampling, 4 = GPS, 5 = *coolbox* dan 6 = *water sampler (van dorn)*

Sampling air dilakukan menggunakan *water sampler vandorn* (**Gambar 2**) pada 8 titik sampling yang telah ditentukan (**Gambar 1**). Posisi dan deskripsi titik-titik sampling tersebut adalah sebagai berikut :

**Tabel 1.** Posisi geografis dan deskrip stasiun pengambilan sampel

STASIUN	Lintang	Bujur	Deskripsi Stasiun	Keterangan
0	-6.03208	106.16339	Sungai	
1	-5.99913	106.15071	Muara	
2	-6.02515	106.16537	Ekosistem lamun (P. Kubur)	
3	-5.99398	106.17039	Tengah Teluk	
4	-5.94931	106.18582	Mulut Teluk	
5	-5.89368	106.20937	Luar Teluk	Dilakukan stratifikasi kedalaman
6	-5.84982	106.24267	Laut Jawa (Selatan P. Tunda)	Dilakukan stratifikasi kedalaman
7	-5.78064	106.25951	Laut Jawa (Utara P.Tunda)	Dilakukan stratifikasi kedalaman
Bagank3	-6.00772	106.17118	Produktivitas Primer	
Bagank4	-5.97946	106.18246	Produktivitas Primer	

Pengambilan sampel dilakukan pada kedalaman 0.5-3 meter untuk semua stasiun tergantung pada kedalaman titik sampling. Sebagai contoh kedalaman pada stasiun 0, 1 dan 2 hanya berkisar sekitar 0.5 meter. Pada beberapa stasiun dilakukan tambahan stratifikasi kedalaman, yaitu 10 meter pada stasiun 5, 20 meter pada stasitun 6 dan 7 (bulan Juli), dan 20 meter dan 40 meter pada stasiun 6 dan 7 (bulan Agustus).

Untuk parameter sistem CO<sub>2</sub> (DIC, alkalinitas dan pH lab), sesaat setelah pengambilan sampel ditambahkan HgCl<sub>2</sub> pada sampel air untuk menghentikan aktivitas biologi dan sampel disimpan dalam *coolbox* yang selalu ditambahkan es batu agar suhu



tetap rendah untuk mencegah terlepasnya CO<sub>2</sub> ke udara (Dickson *et.al.*, 2007). Prosedur pengambilan sampel air untuk klorofil sama dengan parameter CO<sub>2</sub> namun tidak diberikan HgCl<sub>2</sub>. Pencegahan degradasi klorofil terutama dilakukan melalui perlakuan suhu, yaitu menempatkan sampel dalam *coolbox* dan menjaga agar suhunya tetap rendah.

Untuk analisa parameter CO<sub>2</sub>, sampel kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman ukuran 0.45 µm dan hasil saringan ditempatkan pada botol sampel tipe Duran 500 ml secara penuh tanpa gelembung udara untuk analisis lanjut. Prosedur yang sama diterapkan untuk sampel klorofil dengan cara memanfaatkan komponen tertahan di kertas saring.

### 2.3. Analisis.

Secara umum fluks atau pertukaran aliran gas CO<sub>2</sub> antara darat dan laut adalah fungsi 2 parameter yaitu perbedaan konsentrasi CO<sub>2</sub> antara laut dan darat yang merupakan fungsi termodinamika dan kecepatan transfer gas CO<sub>2</sub> yang merupakan fungsi dari faktor hidrodinamika di permukaan laut. Formula umumnya adalah :

$$Flux\ CO_2 = K \cdot \Delta\ CO_2\ atm - water \quad (1)$$

dimana  $K$  adalah kecepatan transfer gas dan  $\Delta\ CO_2\ atm - water$  adalah perbedaan (selisih) antara konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer dengan di permukaan air.

Karena  $\Delta\ CO_2\ atm - water$  sebanding dengan perbedaan  $pCO_2\ atm-water$ , maka formulanya dapat didetilkkan menjadi :

$$Flux\ CO_2 = K \cdot \Delta\ pCO_2\ atm - water \quad (2)$$

Variabel  $K$  adalah fungsi dari kecepatan angin dan kekasaran permukaan laut yang dapat dihitung dari data angin maupun dari data satelit altimetri.

Hingga saat makalah ini ditulis proses analisis perhitungan fluks CO<sub>2</sub> sedang berlangsung, sehingga pembahasan dilakukan hanya pada variabilitas parameter CO<sub>2</sub>, yaitu DIC, alkalinitas, pH dan pCO<sub>2</sub>.

#### 2.3.1. Klorofil dan Parameter CO<sub>2</sub>

Klorofil diukur menggunakan alat spektrometer menurut metode APHA, edisi 21, tahun 2005, 10200-H. Satuan konsentrasi klorofil yang digunakan adalah µg/l.

Sistem CO<sub>2</sub> di perairan dapat dikaji melalui empat parameter yang dapat diukur (*measureble*), yaitu DIC, total alkalinitas (alk), pH dan pCO<sub>2</sub> (tekanan parsial CO<sub>2</sub>) atau fCO<sub>2</sub> (fugasitas CO<sub>2</sub>) (Lewis and Wallace, 1997). Dua dari parameter tersebut dapat dihitung dari dua parameter lainnya (Lewis and Wallace, 1997). Pada studi ini DIC diukur menggunakan metode titrasi dengan prinsip mendasarkan pada perubahan pH setelah ditambahkan HCl dan NaOH pada sampel air yang telah disaring (Giggenbach and Goguel, 1989). DIC didapatkan dari penjumlahan HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> yang terdeteksi setelah ditambahkan HCl dan NaOH. Alkalinitas diukur di laboratorium menggunakan metode titrasi (Anderson and Robinson, 1946) dengan prinsip mendasarkan pada perubahan pH awal dan akhir pada 200 ml sampel (hasil saringan), sebelum dan setelah ditambahkan HCl 0.01 N sebanyak 25 ml. Nilai akhir alkalinitas kemudian didapatkan dari suatu perhitungan.

pCO<sub>2</sub> (tekanan parsial CO<sub>2</sub>) dihitung dari DIC dan pH menggunakan prinsip dasar dari Cai and Wang (1998), yaitu:

$$pCO_2 = \frac{[CO_2]}{K_h} = \frac{DIC\{H\}^2}{(\{H\}^2 + \{H\}K_1 + K_1K_2)K_H} \quad (3)$$

dimana : DIC = *dissolved inorganic carbon*,  $K_h$  adalah konstanta solubilitas gas dalam air menurut Weiss (1974),  $\{H\} = 10^{-pH}$ ,  $K_1$  dan  $K_2$  adalah konstanta disosiasi dari asam karbonat

Secara praktis pCO<sub>2</sub> dihitung menggunakan perangkat lunak **CO2SYS** yang dikembangkan oleh Lewis and Wallace (1997). Di dalam perangkat tersebut terdapat beberapa model perhitungan yang kemudian akan menentukan asumsi dan konstanta yang digunakan untuk menghitung pCO<sub>2</sub>. Model yang digunakan pada studi ini adalah GEOSECS (Takahashi *et.al.*, 1982) dengan pertimbangan tidak ada perbedaan antara pCO<sub>2</sub> dan fCO<sub>2</sub> (fugasitas) dan tidak ada koreksi konsentrasi fosfat dan silikat yang belum diukur pada sampling bulan Juli dan Agustus 2009. Selain DIC dan pH, untuk menghitung pCO<sub>2</sub> model GEOSECS juga memerlukan input parameter untuk koreksi, yaitu suhu (*in situ* maupun laboratorium) dan salinitas. Karena model perhitungan yang digunakan untuk menghitung pCO<sub>2</sub> adalah menggunakan model GEOSECS, maka koreksi suhu dan salinitas juga mengikuti model tersebut, yaitu mengacu pada Mehrbach *et.al.* (1973). Formula perhitungan  $K_1$  dan  $K_2$  yang telah memperhitungkan suhu dan salinitas adalah sebagai berikut (Mehrbach *et.al.*, 1973) :

$$pK_1 = -13.7201 + 0.031334 \times T + 3235.76/T + 1.300 \times 10^{-5} \times S \times T - 0.1032 \times S^{1/2} \quad (4)$$

$$pK_2 = 5371.9645 + 1.671221 \times T + 0.22913 \times S + 18.3802 \times \log(S) - 128375.28/T - 2194.3055 \times \log(T) - 8.0944 \times 10^{-4} \times S \times T - 5617.11 \times \log(S)/T + 2.136 \times S/T. \quad (5)$$

Formula untuk  $K_H$  (atau  $K_o$  di dalam Weiss, 1974) adalah juga bentuk yang telah mengalami koreksi suhu dan salinitas, yaitu (Weiss, 1974) :

$$\ln K_H \text{ (mol/liter.atm)} = -58.0931 + 90.5069(100/T) + 22.2940 \ln(T/100) + S + S[0.027766 + (-0.025888)(T/100) + 0.0050578(T/100)^2] \quad (6)$$

Untuk alkalinitas, koreksi terhadap suhu dan salinitas telah diakomodasi pada perhitungan alkalinitas pada metode yang dipakai, yaitu Giggensbach and Goguel (1989), sebagai berikut :

$$\text{Total alkalinitas (meq/l)} = 2.500 - 1250 \frac{ah}{f} \quad (7)$$

dimana untuk persamaan (4), (5), (6) dan (7):

$$pK = -\log_{10} K$$

T = suhu absolut, S = salinitas

$ah = 10^{-pH}$ , dimana pH adalah setelah ditambahkan asam HCl 0.01 N

$f$  = koefisien yang didapatkan dari tabel suhu dan salinitas pada Giggensch and Goguel (1989)

$pCO_2$  merupakan salah satu parameter kunci dalam mengetahui sistem  $CO_2$  di perairan. Untuk mengkaji variabilitas dari  $pCO_2$  ini dilakukan analisis regresi linear tunggal antara  $pCO_2$  dengan DIC, pH, Alk, suhu dan klorofil. Pembahasan kemudian didasarkan pada nilai  $R^2$  yang didapatkan.

### 2.3.2. Analisa 'Sink & Source' $CO_2$

Analisis 'sink & source'  $CO_2$  dilakukan untuk menentukan apakah suatu perairan penyerap atau pelepas  $CO_2$ . Analisis ini dilakukan dengan mengurangkan nilai  $pCO_{2atm}$ , atau tekanan parsial  $CO_2$  di atmosfer dengan nilai  $pCO_{2water}$  yang telah didapatkan dari perhitungan (persamaan 3). Secara ideal  $pCO_{2atm}$  didapatkan melalui pengukuran langsung secara simultan dengan  $pCO_{2water}$ . Namun karena keterbatasan peralatan,  $pCO_{2atm}$  didapatkan dari nilai IPCC tahun 2008 yaitu 385  $\mu atm$  dan diasumsikan seragam untuk semua wilayah. Formula umumnya :

$$\Delta pCO_2 = pCO_{water} - pCO_{2atm} \quad (8)$$

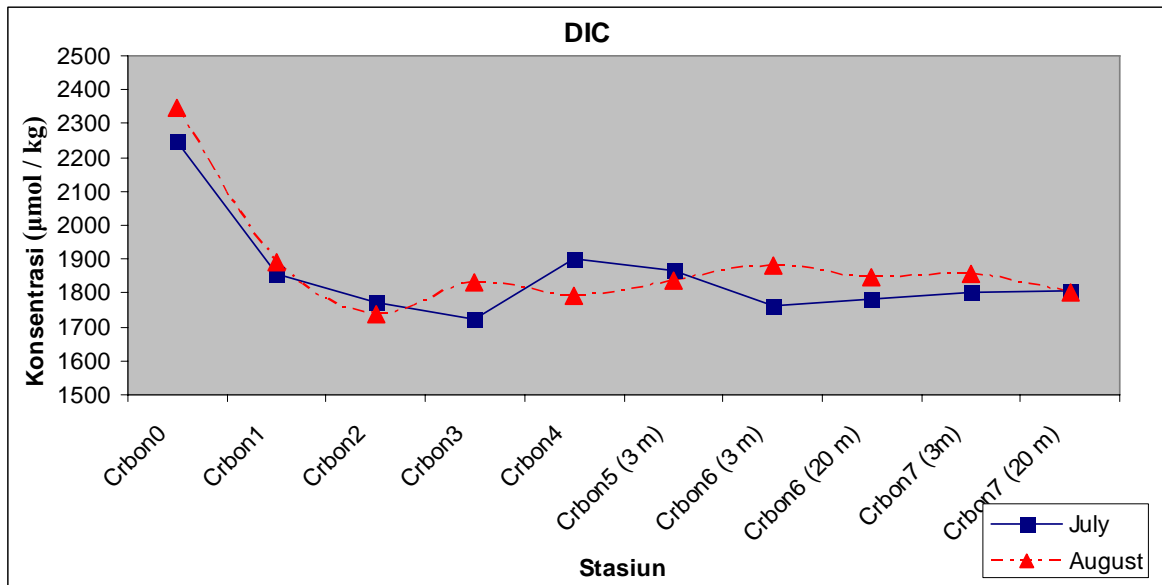
Suatu perairan berperan sebagai 'source' atau pelepas  $CO_2$  ke udara / atmosfer jika nilai  $pCO_2$ -nya lebih tinggi dari nilai atmosfer (nilai positif) karena akan terjadi aliran  $CO_2$  dari air ke atmosfer dan sebaliknya berperan sebagai penyerap / 'sink'  $CO_2$  dari atmosfer jika nilai  $pCO_2$ -nya lebih rendah dari  $pCO_{2atm}$  (nilai negatif).

## 3. Hasil dan Pembahasan

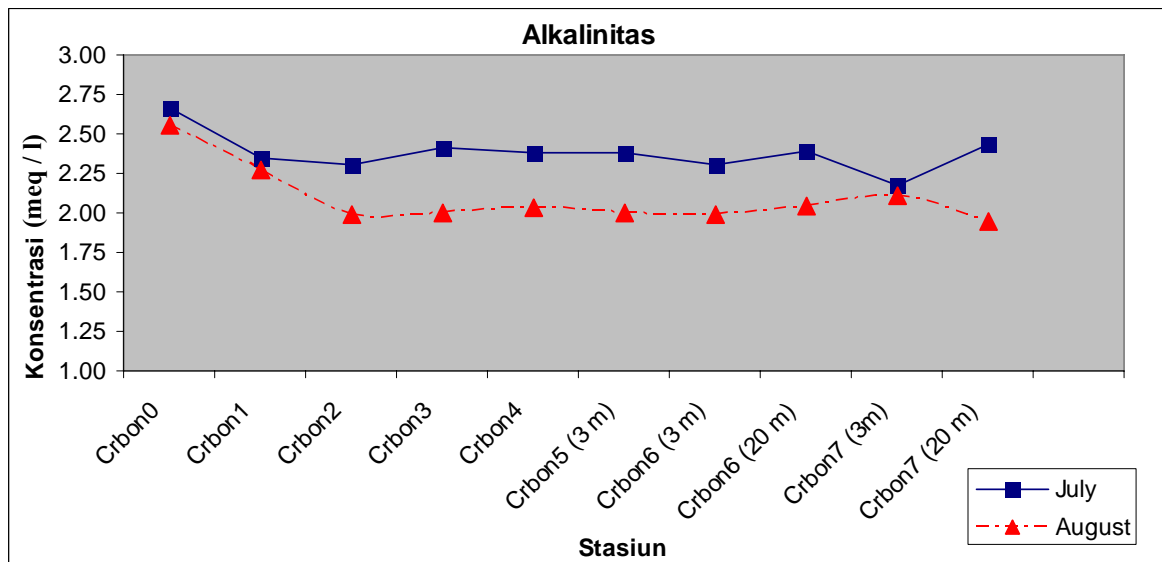
### 3.1. Variabilitas Parameter $CO_2$ di Teluk Banten Pada Bulan Juli dan Agustus 2009

Hasil menunjukkan pada bulan Juli DIC berkisar antara 1722.40 – 2249.18  $\mu mol/kg$  dan bulan Agustus antara 1735.32 – 2348.23  $\mu mol/kg$ . Alkalinitas lokasi studi berkisar antara 2.18 – 2,66 meq/L pada bulan Juli 2009 dan 1.94 – 2.55 meq/L pada bulan Agustus 2009. Distribusi spasial konsentrasi DIC dan alkalinitas pada bulan Juli dan Agustus 2009 ditampilkan pada gambar 3 dan 4, yang secara umum keduanya menunjukkan konsentrasi yang tinggi pada perairan yang bersalinitas rendah dan berangsur menurun pada perairan laut.





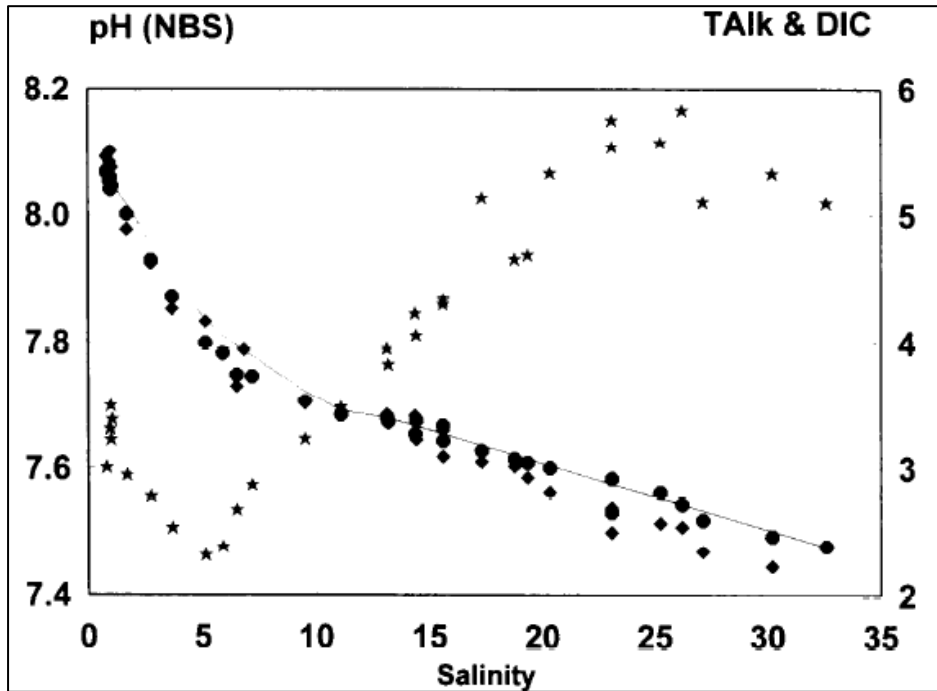
**Gambar 3.** Konsentrasi DIC bulan Juli dan Agustus 2009.



**Gambar 4.** Konsentrasi Alkalinitas bulan Juli dan Agustus 2009. Satuan yang digunakan = meq / l

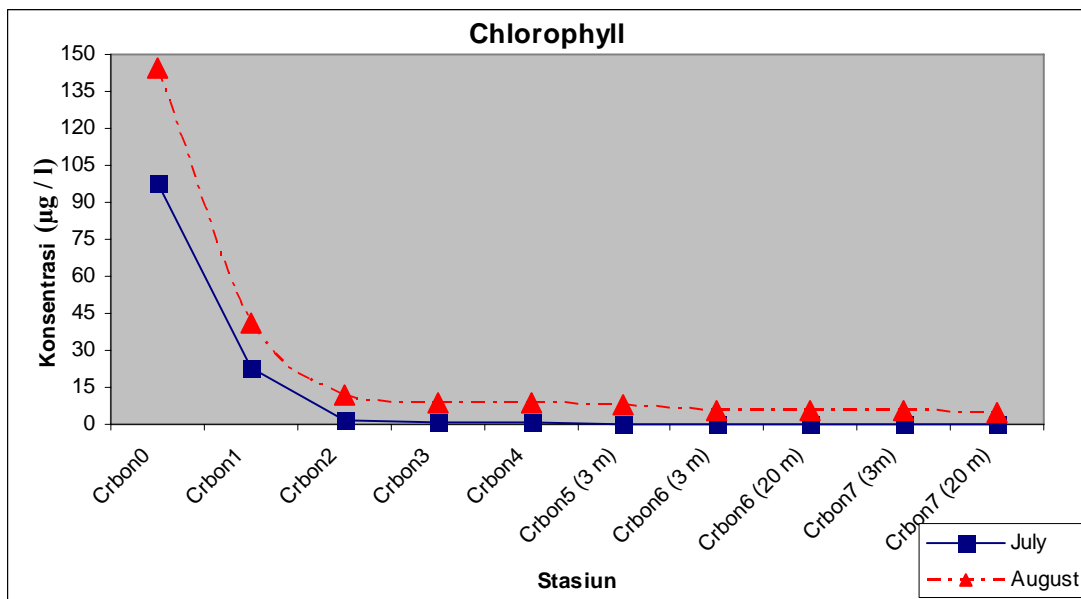
Secara umum pola DIC dan alkalinitas yang didapatkan pada studi awal ini berkesesuaian dengan yang didapatkan oleh Frankigenoule *et.al.* (1996) (Gambar 5) yang melakukan penelitian sistem CO<sub>2</sub> perairan pada julat salinitas 0 – 35 di sungai Scheldt, Belgia yang mewakili nilai perairan sungai, estuari dan laut (Gambar 5). Pada julat salinitas 20 – 30 (julat salinitas pada penelitian ini) (Gambar 5), julat nilai alkalinitasnya adalah 2- 3 meq/l dan julat DIC-nya adalah 2000-3000 µmol/kg. Sungai Scheldt adalah sungai yang melewati wilayah industri di Belanda dan Belgia, dan dikategorikan sebagai sungai tercemar. Walaupun tidak sama persis karakteristiknya namun bagian hilir dari sungai Banten juga merupakan pemukiman nelayan padat dan secara visual dapat dilihat perairannya yang keruh dan berminyak. Selanjutnya Dickson *et.al.*(2007) menyebutkan bahwa julat DIC untuk perairan oseanik adalah 1800 – 2300 µmol/kg dan untuk alkalinitas adalah 2000 – 2500 µmol/kg (kurang lebih setara dengan

2 – 2.5 meq/l). Cai and Wang (1998) mendapatkan nilai DIC 1500 – 1900  $\mu\text{mol/kg}$  dan alkalinitas 1.5 – 2.2 meq/l untuk julat salinitas 20 – 30 di estuari sungai Duplin, Georgia, Amerika.



Gambar 5. pH, Alkalinitas dan DIC di Sungai Scheldt Belgia. ★ = pH, ◆ = DIC ( $\mu\text{mol/kg}$ ) ● = Alk (meq/ kg). Sumber : Frankigenoule *et.al.* (1996)

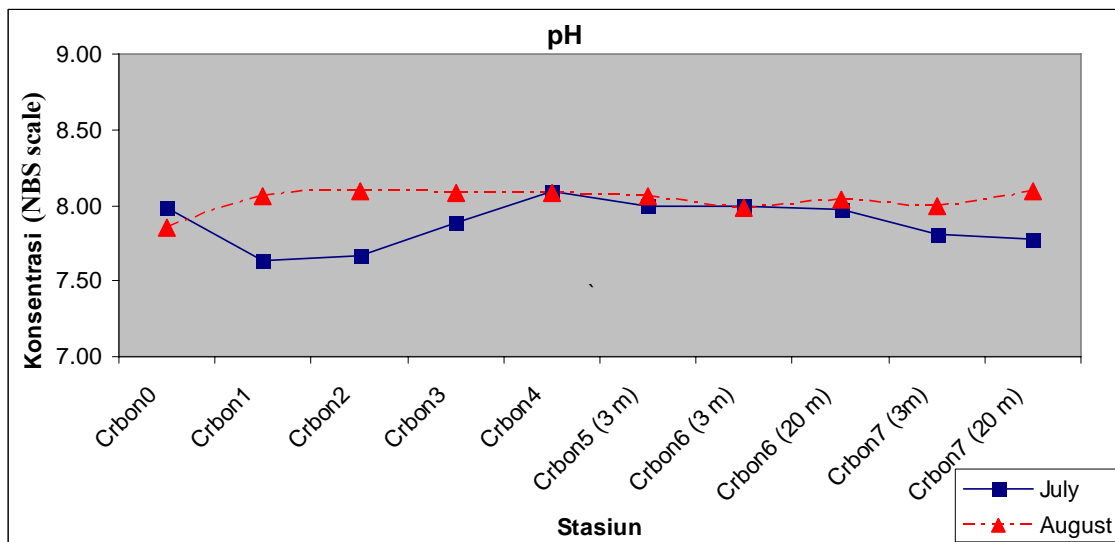
Stasiun ‘carbon 0’ terletak kurang lebih 100 meter sebelum muara dan dapat dikatakan masih dalam pengaruh estuari. Perairan estuari dipengaruhi oleh pasang surut dan mempunyai waktu tinggal (*residence time*) cukup lama bagi massa air tawar yang dapat menstimulasi aktivitas kimia dan biologi materi yang terbawa oleh sungai. Hal ini berarti bahwa perairan estuari dapat merupakan perairan dengan aktivitas biologi yang tinggi dan berpotensi menurunkan konsentrasi DIC. Suburnya perairan estuari juga terbukti pada data klorofil yang diukur pada studi ini (Gambar 6), yang secara umum tinggi pada perairan sungai/estuari dan berangsur rendah pada perairan oseanik.



Gambar 6. Konsentrasi klorofil.

Tidak terjadinya penurunan DIC di perairan estuari pada studi ini diduga karena faktor antropogenik dan proses di daerah hulu lebih dominan dalam menyumbang DIC dibandingkan faktor biologi. Faktor lain yang mungkin adalah tingginya bahan organik, -yang antara lain diindikasikan tingginya klorofil-, sehingga memicu proses dekomposisi bakteri dan menciptakan kondisi anaerob yang meningkatkan DIC (Frankigenoule *et.al.*, 1996). Dugaan ini juga timbul karena perbedaan parameter-parameter seperti suhu, salinitas dan pH antara pengukuran lapangan dan di laboratorium telah secara baku dikalkulasi dalam software CO2SYS. Faktor antropogenik dan proses di daerah hulu juga diduga lebih berperan dalam variabilitas alkalinitas di wilayah estuari terutama sumbangan  $\text{CaCO}_3$ -nya dibandingkan sumbangan  $\text{CaCO}_3$  dari proses kalsifikasi karang yang tidak terdapat wilayah sekitar estuaria.

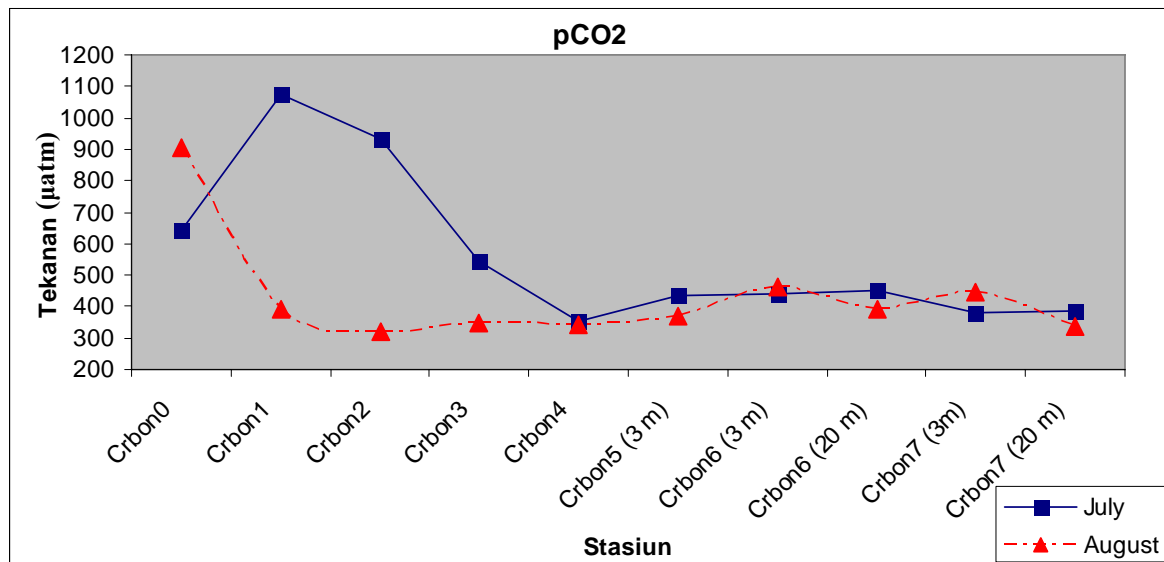
Selain faktor-faktor tersebut perbedaan pasang surut pada kedua bulan juga diduga menyumbang variabilitas lokal konsentrasi DIC dan alkalinitas dikarenakan pengambilan sampel pada stasiun-stasiun penelitian tidak selalu tepat pada tanggal dan jam yang sama. Penelitian Wang dan Cai (2004) di estuaria sungai Duplin, Georgia, Amerika mendapatkan perbedaan DIC saat pasang dan surut hingga 100 – 200  $\mu\text{mol/kg}$ . Walaupun tipe estuaria antara sungai Duplin dan teluk Banten perlu juga dipertimbangkan lebih lanjut, tapi setidaknya faktor pasut terbukti memberikan pengaruh pada sistem  $\text{CO}_2$  perairan. Pada tahap lanjut dari penelitian ini faktor pasang surut akan disertakan baik dengan memplotkan data parameter karbon dengan data pasang surut (dari model ataupun observasi) maupun dengan mengambil sampling air pada 1 siklus pasang surut dengan interval jam. Pengetahuan mengenai pasut juga akan menambah informasi untuk analisis mixing antara massa air tawar dan laut. Aspek tambahan yang juga perlu disertakan untuk mengetahui lebih detil distribusi spasial parameter  $\text{CO}_2$  adalah faktor hidrodinamika, khususnya pola arus lokal yang dapat berperan mendistribusikan parameter  $\text{CO}_2$ .



**Gambar 7.** pH bulan Juli dan Agustus 2009. Satuan yang digunakan = NBS (*National Bureau Standard*) (Cai and Wang, 1998).

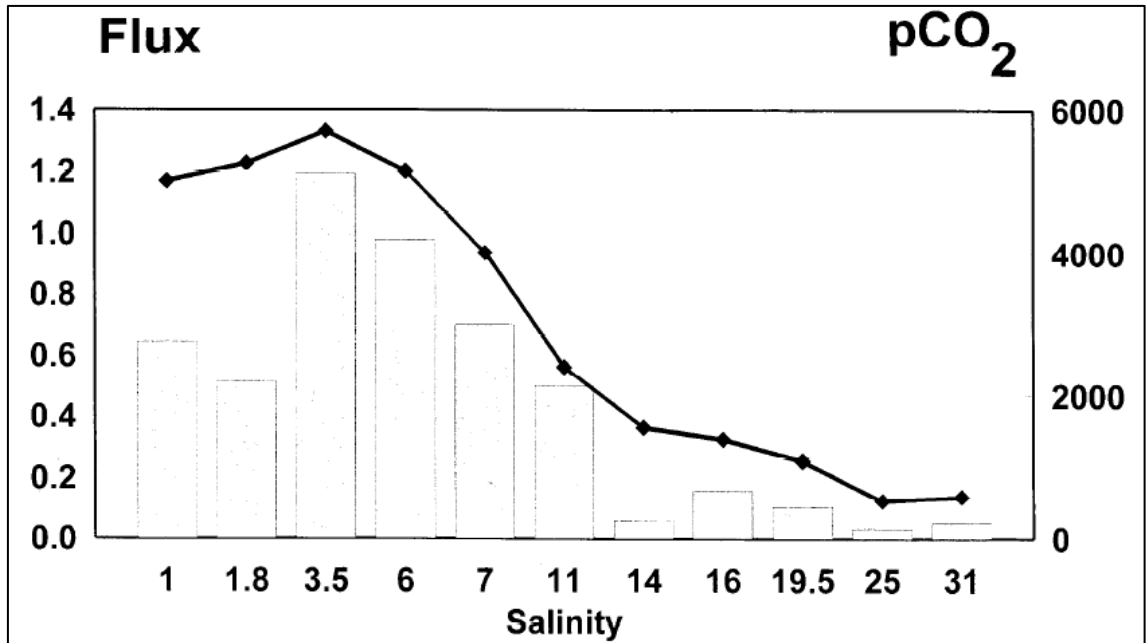
Pada bulan Juli 2009 pH lokasi studi berkisar antara 7.63-8.09 dan pada bulan Agustus 2009 antara 7.85 – 8.09. pH perairan (gambar 7) juga menunjukkan variabilitas yang kurang lebih berkebalikan dengan DIC dan alkalinitas yaitu nilai pH rendah pada

salinitas rendah dan sedikit meningkat pada perairan oseanik. Variabilitas pH di wilayah studi juga diduga disebabkan oleh pengaruh pasut yang mendistribusikan massa air tawar ke arah laut saat surut dan sebaliknya. Untuk membuktikan dugaan ini, ke depan akan dilakukan analisis load DIC di sungai, estuari dan laut.



Gambar 8. pCO<sub>2</sub> bulan Juli dan Agustus 2009.

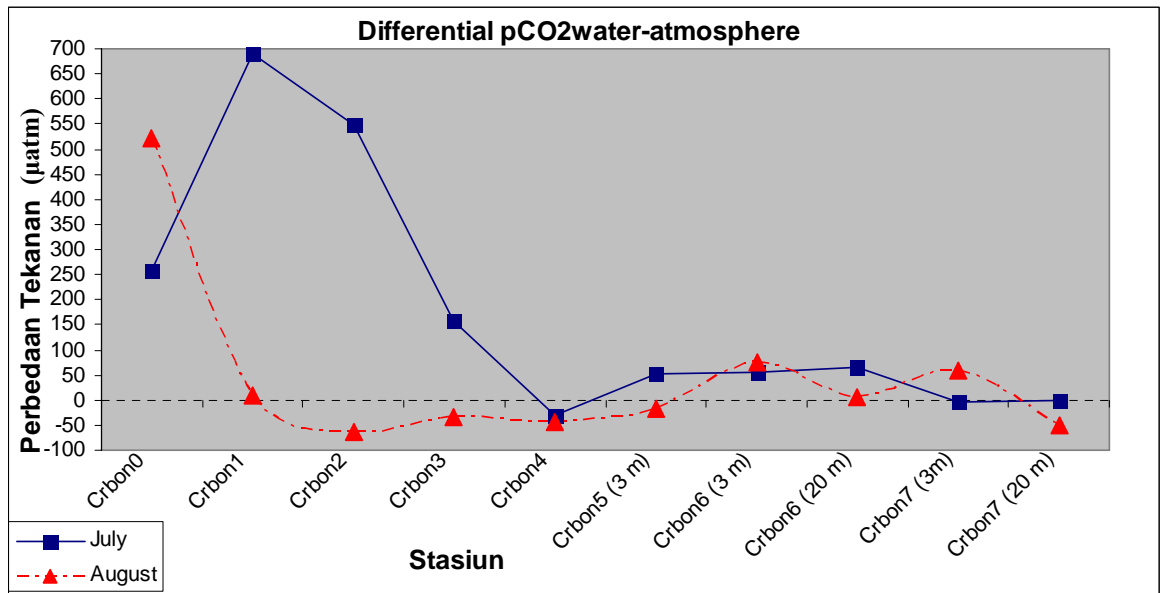
Seperti yang telah diduga dari tingginya nilai DIC di perairan estuari, nilai pCO<sub>2</sub> (Gambar 8) juga mempunyai pola yang relatif sama, yaitu tinggi pada perairan estuari (salinitas rendah) dan rendah pada perairan oseanik (salinitas tinggi). Nilai pCO<sub>2</sub> pada lokasi studi berkisar antara 354.18 – 1075.94 µatm pada bulan Juli 2009 dan 322.80 – 907.17 µatm pada bulan Agustus 2009. Pada penelitian ini, karena kendala alat pengukur pCO<sub>2</sub> atmosfer maka parameter tersebut diambil dari nilai IPCC, yaitu 385 µatm dan diasumsikan sama untuk semua wilayah sehingga pengaruhnya konstan. Seperti telah disebutkan pada bagian metode, pCO<sub>2</sub> pada studi ini dihitung dari nilai DIC dan pH sehingga hasil akhir akan terpengaruh oleh kedua variabel tersebut dan parameter-parameter input lain pada model GEOSECS, yaitu salinitas dan suhu (*in situ* dan laboratorium). Selain variabel-variabel utama pembentuknya, yaitu pH dan DIC, dan variabel koreksinya yaitu suhu dan salinitas, perbedaan nilai pCO<sub>2</sub> pada perairan estuari antara bulan Juli dan Agustus diduga juga dipengaruhi oleh perbedaan pasang surut saat pengambilan sampel yang mempengaruhi semua variabel tersebut. Penelitian Wang and Cai (2004) di estuaria sungai Duplin mendapatkan bahwa perbedaan maksimum pCO<sub>2</sub> pada skala pasut dapat mencapai 1800 µatm, yaitu 700 µatm saat pasang dan 2500 µatm saat surut. Aliran massa air dari sungai dapat membawa lebih banyak DIC yang dapat meningkatkan nilai pCO<sub>2</sub>. Pola dari nilai pCO<sub>2</sub> pada studi ini juga seperti yang didapatkan oleh Frankigenoule *et.al.* (1996) di sungai Scheldt (Gambar 9).



Gambar 9.  $pCO_2$  di Sungai Scheldt Belgia (unit dalam  $\mu atm$ ). Sumber : Frankignoulle *et.al.* (1996)

### 3.2. Analisa 'Sink dan Source' $CO_2$ di Teluk Banten

Gambar 10 menampilkan hasil selisih antara nilai  $pCO_{water} - pCO_{2atm}$  (persamaan 8).



Gambar 10. Perbedaan konsentrasi  $pCO_{2water} - pCO_{2atm}$  bulan Juli dan Agustus 2009. Satuan yang digunakan =  $\mu atm$ . Garis - - - adalah nilai 0 untuk membedakan  $pCO_2$  negatif dan positif.

Hasil analisis menunjukkan pada bulan Juli dan Agustus 2009 perairan sungai / estuari merupakan pelepas (*source*) CO<sub>2</sub> ke atmosfer yang ditunjukkan oleh nilai pCO<sub>2</sub> positif, sedangkan perairan bersalinitas lebih tinggi ( ke arah laut Jawa) menunjukkan hasil yang bervariasi yaitu sebagai sink ataupun source. Hasil penelitian sebelumnya juga masih bervariasi mengenai peran estuari atau secara lebih umum, pesisir, terhadap CO<sub>2</sub> atmosfer. Hasil penelitian Cai *et.al.* (2006) dan Borges *et.al.* (2005) secara eksplisit menyatakan bahwa perairan pesisir tropis, utamanya wilayah *interface* darat-laut, termasuk estuari dan mangrove, berperan sebagai pelepas CO<sub>2</sub> kuat ke atmosfer dikarenakan input karbon organik dari daratan yang memicu kondisi heterotropik. Namun penelitian Tsunogai *et.al* (1999) menyatakan bahwa daerah paparan benua (*continental shelf*), terutama yang dipengaruhi oleh sungai berperan sebagai penyerap CO<sub>2</sub>.

Untuk mengetahui faktor-faktor penyebab variabilitas pCO<sub>2</sub> di wilayah studi maka dilakukan analisis regresi linier sederhana antara pCO<sub>2</sub> dengan DIC, Alkalinitas, pH, suhu dan klorofil (Tabel 2). Namun demikian pembahasan lebih dikhususkan kepada faktor suhu dan klorofil yang mewakili aspek fisik dan biologi. Pembahasan ini juga dilakukan karena dimungkinkan memprediksi atau menduga pCO<sub>2</sub> dari suhu dan atau klorofil yang merupakan produk satelit penginderaan jauh (Lohrenz dan Cai, 2006; Lefevre *et.al.*, 2002; Chierici *et.al.*, 2009). Secara ideal analisis statistik yang diterapkan adalah menggunakan PCA (*principal component analysis*) (Lohrenz dan Cai, 2006) atau regresi linier berganda menggunakan prinsip Marquadt-Levenberg (Chierici *et.al.*, 2009). Pada studi ini baru dilakukan analisa regresi linier sederhana tunggal dan mendasarkan pembahasan pada nilai R<sup>2</sup> yang didapatkan.

**Tabel 2.** Kompilasi nilai R<sup>2</sup> dari hasil analisa regresi linear tunggal antara pCO<sub>2</sub> dengan masing-masing DIC, Alk, pH, suhu dan klorofil

	DIC		Alk		pH		Suhu		Klorofil	
	July	August	July	August	July	August	July	August	July	August
<b>pCO<sub>2</sub></b>	0.0508	0.9633	0.0249	0.7927	0.4455	0.8143	0.632	0.4239	0.1725	0.9442

Hasil kompilasi nilai R<sup>2</sup> (Tabel 2) menunjukkan bahwa pada bulan Juli 2009 nilai pCO<sub>2</sub> lebih dipengaruhi oleh suhu (R<sup>2</sup> = 0.632) dibandingkan klorofil (R<sup>2</sup>=0.1725). Lefevre *et. al* (2002) mendapatkan nilai R<sup>2</sup> = 0.65 untuk regresi antara pCO<sub>2</sub> dengan suhu di wilayah upwelling daerah lepas pantai Chili, kemudian Chen *et.al.* (2007) mendapatkan nilai R<sup>2</sup> = 0.84 untuk wilayah perairan kepulauan di Hawaii sedangkan Chierici *et.al.* (2009) mendapatkan R<sup>2</sup> = 0.68 untuk wilayah perairan Atlantik Utara. Wilayah studi ini dapat dikatakan mempunyai dominan karakteristik pesisir, perairan oseanik hanya ada pada beberapa titik terluar. Karena cukup kompleksnya materi dan proses yang ada pada perairan pesisir diduga tidak hanya suhu yang menyumbang kepada nilai pCO<sub>2</sub> dan hal ini mempunyai efek ‘menurunkan’ nilai R<sup>2</sup>. Hasil ini dapat disepadankan dengan perairan upwelling (Levefre *et.al.*, 2002) karena perairan upwelling menerima variabilitas suhu dan nutrien yang cukup kompleks dari massa air bawah permukaan. Hal ini berbeda dengan perairan oseanik yang tidak mendapat input materi kompleks dari daratan sebagaimana perairan pesisir.

Hasil nilai R<sup>2</sup> pada bulan Agustus 2009 menunjukkan bahwa pCO<sub>2</sub> lebih dipengaruhi oleh klorofil (R<sup>2</sup> = 0.9442) dibandingkan suhu (R<sup>2</sup>=0.1725). Nilai R<sup>2</sup> yang cukup tinggi untuk klorofil ini perlu mendapatkan pengujian dan penelitian lebih lanjut



karena nilai yang didapatkan oleh Chierici *et. al.* (2009) cukup rendah untuk regresi antara pCO<sub>2</sub> dengan klorofil, yaitu  $R^2 = 0.68$  atau sama dengan yang didapatkan pada suhu pada penelitian mereka. Walaupun nilai klorofil di perairan oseanik lebih rendah dibandingkan perairan estuari / sungai, pengaruh klorofil pada perairan oseanik diduga lebih 'murni' karena tidak tercampur dengan pengaruh materi anorganik seperti pada perairan estuari. Untuk mendapatkan kesimpulan final mengenai hubungan antara pCO<sub>2</sub> dengan parameter suhu dan klorofil maka diperlukan pengukuran dan pengujian lebih lanjut menggunakan data yang lebih banyak yang mencakup variabilitas musiman.

#### **4. Kesimpulan**

1. Distribusi spasial parameter CO<sub>2</sub> di Teluk Banten pada bulan Juli dan Agustus 2009 diduga disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu input materi dari darat, pengaruh pasang surut dan pola oseanografi lokal.
2. Pada bulan Juli dan Agustus 2009 Perairan sungai dan estuari di sungai Banten, teluk Banten cenderung berperan sebagai pelepas CO<sub>2</sub> ke atmosfer sedangkan stasiun-stasiun bersalinitas lebih tinggi berperan baik sebagai *sink* maupun *source* bagi CO<sub>2</sub> atmosfer.
3. Faktor suhu lebih mempengaruhi variabilitas nilai pCO<sub>2</sub> pada bulan Juli 2009, sedangkan pada bulan Agustus 2009 nilai pCO<sub>2</sub> lebih dipengaruhi oleh klorofil.

#### **Saran**

1. Diperlukan pengukuran yang lebih banyak dan sering pada lokasi penelitian untuk menjelaskan sistem CO<sub>2</sub> sehingga dapat mewakili variabilitas musiman dan siklus pasang surut.
2. Diperlukan pengukuran aspek oseanografi, utamanya pasang surut dan pola arus lokal untuk lebih menjelaskan secara lengkap distribusi spasial dan temporal sistem CO<sub>2</sub> di teluk Banten.
3. Diperlukan pengukuran parameter-parameter produk data penginderaan jauh yang lebih banyak (klorofil dan suhu) untuk membangun algoritma yang dapat digunakan untuk mengekstrak pCO<sub>2</sub> dan fluks CO<sub>2</sub> dari data penginderaan jauh.

#### **Ucapan Terimakasih.**

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Riset Wilayah dan Sumberdaya Nonhayati, BRKP, DKP atas dukungan yang diberikan hingga terlaksananya penelitian ini. Diskusi yang bermanfaat juga diberikan oleh pihak Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi (PATIR), BATAN mengenai metode pengukuran DIC dan alkalinitas. Terakhir, penulis mengucapkan terimakasih kepada *reviewer* anonim yang telah memberikan saran berarti bagi perbaikan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, D.H and R.J. Robinson. 1946. Rapid Electrometric Determination of the Alkalinity of Sea Water. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, Vol. 18, p767-769.
- Behrenfeld, M. J., E. Boss, D. A. Siegel, and D. M. Shea .2005. Carbon-based Ocean Productivity and Phytoplankton Physiology from Space. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB1006, doi:10.1029/2004GB002299.
- Borges, A. V., B. Delille, and M. Frankignoulle. 2005. Budgeting Sinks and Sources of CO<sub>2</sub> in the Coastal Ocean: Diversity of Ecosystems Counts. *Geophysical Research Letters.*, 32, L14601, doi:10.1029/2005GL023053.
- Cai, W.J., Dai, M., and Wang, Y. 2006. Air-Sea Exchange of Carbon Dioxide in Ocean Margins : A Province Based Synthesis. *Geophysical Research Letters*, Vol.33. L12603, doi: 10.1029/2006GL026219.
- Cai, W.-J and Wang, Y. 1998. The Chemistry, Fluxes and Sources of Carbon Dioxide in the Estuarine Waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia. *Limnology and Oceanography*, 43, 657–668.
- Chen,F, W.J, Cai, C.B, Nelson, and Y.Wang. 2007. Sea Surface pCO<sub>2</sub>-SST Relationships Across A Cold-Core Cyclonic Eddy: Implications for Understanding Regional Variability and Air-Sea Gas Exchange. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L10603, Doi: 10.1029/2006gl028058.
- Chierici, M, A.Olsen, T. Johannessen, J. Trinanes and R. Wanninkof. 2009. Algorithms to Estimate the Carbon Dioxide Uptake in the Northern North Atlantic Using Shipboard Observations, Satellite and Ocean Analysis Data. *Deep Sea Research II*, 56, 630-639.
- Dickson, A.G., Sabine, C.L. and Christian, J.R. (Eds). 2007. Guide to Best Practice for Ocean CO<sub>2</sub> Measurements. PICES Special Publication 3, 191p.
- Fletcher, S.E.M., N. Gruber., A.R. Jacobson., S.C. Doney., S. Dutkiewicz., M. Gerber., M. Follows., F. Joos., K. Lindsay., D. Menemenlis., A. Mouchet., S. A. Muller and J.L. Sarmiento. 2006. Inverse Estimates of Anthropogenic CO<sub>2</sub> Uptake, Transport and Storage by the Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 20. Doi:10.1029/2005GB002530.
- Frankigenoule, M, I. Bourge and R. Wollast.1996. Atmospheric CO<sub>2</sub> Fluxes in a Highly Polluted Estuary (the Scheldt). *Limnology and Oceanography*. 41(2), 365-369.
- Giggenbach, W.F and R.L. Goguel. 1989. Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges. Report No. CD 2401, 4th edition. Chemistry Division , Department of Scientific and Industrial Research. Peton, New Zealand.
- Green, E.P and F.T. Short. 2003. World Atlas of Seagrass. UNEP & WCMC.
- Kunarso., S. Hadi., Nining Sari Ningsih dan A. Supangat. 2009. *Upwelling dan Fishing Ground* Tuna di Laut Nusantara. Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Lewis, E and D.Wallace. 1997. CO<sub>2</sub>SYS. Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations. Department of Applied Science, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.
- Lefevre, N., J. Aiken., J. Rutllant., G. Daneri., S. Lavender and T. Smyth. 2002. Observations of pCO<sub>2</sub> in the Coastal Upwelling off Chile: Spatial and Temporal Extrapolation Using Satellite Data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. C6, 3055, 10.1029/2000jc000395.

- Lohrenz, S.E. and W.J. Cai. 2006. Satellite Ocean Color Assessment of Air-Sea Fluxes of CO<sub>2</sub> in A River-Dominated Coastal Margin. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L01601, Doi: 10.1029/2005gl023942.
- Mehrbach, C., C.H. Culberson., J.E., Hawley and R.M. Pytkowics. 1973. Measurement of the Apparent Dissociation Constants of Carbonic Acid in Seawater at Atmospheric Pressure. *Limnology and Oceanography*, Vol. 18 (6).
- Milliman, J. D and J. P. M. Syvitski. 1992. Geomorphic / Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: the Importance of Small Mountainous Rivers. *J. Geol.*, 100, 525– 544.
- Moore, J.K., M.R. Abbott, J.G. Richman and D.M. Nelson. 2000. The Southern Ocean at the Last Glacial Maximum: A Strong Sink for Atmospheric Carbon Dioxide. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.14, No.1, 455-475.
- Peta Lingkungan Pantai Indonesia, Lembar LPI 1110-09, Teluk Banten, 1999. Bakosurtanal dan Dishidros.
- Raven, J.A and Falkowski, P.J. 1999. Oceanic Sinks for Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant, Cell and Environment*, 22, 741-755.
- Sabine, C.L., R.A. Feely., N. Gruber., R.M. Key., K. Lee., J.L. Bullister., R. Wanninkhof., C.S. Wong., D.W.R. Walles., B. Tilbrook., F.J. Millero., T.H. Peng., A. Kozyr., T. Ono and A.F. Rios. 2004. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, 305, 367–371.
- Setyawan, W.B., M. Hasanudin., Winardi., E. Kusmanto., Y. Witasari dan J.M. Manik. 2003. Studi Karakteristik Garis Pantai Propinsi Banten. Pusat Penelitian Oseanografi LIPI. Jakarta.
- Takahashi, T., R. T. Williams and D. L. Bos. 1982. Carbonate Chemistry. pp. 77-83. In W. S. Broecker, D. W. Spencer, and H. Craig, *GEOSECS Pacific Expedition, Volume 3, Hydrographic Data 1973-1974*. National Science Foundation, Washington, D.C.
- Tsunogai, S., S. Watanabe, and T. Sato.1999. Is There A “Continental Shelf Pump” for the Absorption of Atmospheric CO<sub>2</sub>? *Tellus, Ser. B*, 51, 701– 712.
- Wang, Z. H. A., and W. J. Cai (2004), Carbon Dioxide Degassing and Inorganic Carbon Export From A Marsh-Dominated Estuary (the Duplin River): A marsh CO<sub>2</sub> pump, *Limnology and Oceanography*, 49, 341-354.
- Weiss, R.F., 1974. Carbon Dioxide in Water and Seawater, the Solubility of a Non-ideal Gas. *Mar. Chem.* 2, 203–215.