

DINAMIKA DISSOLVED INORGANIC CARBON (DIC) DI EKOSISTEM LAMUN PULAU PARI

Agustin Rustam^{1),2)}, Dietrich G Bengen¹⁾, Zainal Arifin³⁾ & Jonson L Gaol¹⁾

¹⁾Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Institut Pertanian Bogor

²⁾Badan Penelitian dan Pengembangan Kelautan dan Perikanan, KKP

³⁾Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

Diterima tanggal: 11 Juli 2013; Diterima setelah perbaikan: 11 Maret 2014; Disetujui terbit tanggal 5 Juni 2014

ABSTRAK

Perairan pesisir mewakili 8% perairan laut global. Salah satu ekosistem perairan pesisir adalah ekosistem lamun. Peranan perairan pesisir terutama ekosistem lamun sebagai sumber atau penyerap karbondioksida (CO₂) dari atmosfer ke laut dan dinamika karbon inorganik terlarut (*Dissolved Inorganic Carbon/DIC*) masih sangat kurang. Penelitian ini bertujuan menganalisa data DIC dan data lingkungan di ekosistem lamun Pulau Pari secara temporal mewakili musim barat, musim timur dan musim transisi selama periode 2011 – 2012 pada air laut dan air poros. DIC tertinggi terjadi pada musim timur dan terendah pada musim barat. Total alkalinitas (TA) dan tekanan parsial gas CO₂ (pCO₂) memiliki pola yang sama dengan DIC, tinggi pada musim timur dan rendah pada musim barat. Dinamika DIC dan TA pada air laut dipengaruhi temperatur, sedangkan pada air poros tidak terlihat faktor yang mempengaruhi DIC. Parameter TA di air poros dipengaruhi oleh total padatan tersuspensi (*Total Suspended Solid/TSS*). Musim barat ekosistem lamun berperan sebagai penyerap CO₂ dengan fluks sebesar 3,237 mmolC/m²/hari. Musim timur dan musim transisi berperan sebagai pelepas CO₂ dengan fluks tertinggi pada musim timur sebesar 11,669 mmolC/m²/hari.

Kata kunci: Ekosistem Lamun, DIC, fluks CO₂ atmosfer – air laut, Pulau Pari

ABSTRACT

Coastal water represents 8% of the global ocean. The one of coastal ecosystem is seagrass ecosystem. The role of coastal ecosystem, such as seagrass ecosystem as source or sink carbondioxide (CO₂) from atmosphere to sea and dynamic of Dissolved Inorganic Carbon (DIC) has not been fully understood. The objective of study is analyzed DIC data and ancillary environment data in seagrass ecosystem at temporal represent west, east and transition monsoon season as long as 2011 – 2012 in seawater and porewater. The higher DIC in seawater and porewater is east monsoon season. The lowest DIC in seawater and porewater is west monsoon season. Total alkalinity (TA) and partial pressure of CO₂ (pCO₂) have the same pattern with DIC, they are high in east monsoon season and low in west monsoon season. Dynamic of DIC and (TA) every season in seawater are affected temperature, while in porewater is not visible factors affecting of DIC. Parameter of TA in porewater is influenced by total suspended solid (TSS). West monsoon season, seagrass ecosystem roles as CO₂ sink with the flux is 3.237 mmolC/m²/day. East and transition monsoon season, seagrass ecosystem plays a role as CO₂ source with the flux of 11.669 mmolC/m²/hari.

Keywords: seagrass ecosystem, DIC, the air –water CO₂ flux, Pari Island

PENDAHULUAN

Perairan pesisir mewakili sekitar 8% dari perairan laut secara global menghasilkan 25% produktivitas primer lautan yang membutuhkan karbondioksida dalam fotosintesisnya (Ribas-Ribas *et al.*, 2011). Diketahui bahwa secara global laut melepaskan CO₂ sebanyak 90 GtC/tahun dan menyerap 92 GtC/tahun sehingga ada selisih 2 GtC/tahun yang ditenggelamkan (*sink*) (Cai *et al.*, 2006; Fletcher *et al.*, 2006). Proses penenggelaman yang terjadi meliputi berbagai proses baik *solubility pump*, *physical pump* maupun *biological pump*. Kemampuan lautan menenggelamkan karbon sebanyak 2 GtC/tahun lebih banyak difokuskan di lautan lepas dan wilayah lintang tinggi. Masih sedikitnya penelitian mengenai kemampuan perairan pesisir (laut dangkal) menenggelamkan karbon dapat

disebabkan karena terbatasnya vegetasi pesisir dari seluruh lautan yang hanya > 2 % dari seluruh permukaan laut dan samudra (Duarte & Cebrian, 1996). Bouillon & Connolly (2009) mengatakan bahwa perairan pesisir daerah tropis merupakan bagian penting dalam siklus karbon global karena tingginya produktivitas yang terjadi baik dari sungai maupun ekosistem *mangrove*, lamun dan terumbu karang. Walaupun demikian diperkirakan laut marginal termasuk pesisir mampu menenggelamkan CO₂ berkisar antara 0,22 PgC/tahun – 1 PgC/tahun (Borges, 2005; Borges *et al.*, 2005; Borges, 2011). Oleh karena itu perlunya perhitungan ulang kembali kemampuan lautan dalam menenggelamkan CO₂ dari atmosfer dengan memperhitungkan kemampuan ekosistem pesisir (lamun, *mangrove*, estuaria, rawa asin).

Korespondensi Penulis:

Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta Utara 14430. Email: a_rustam@kkp.go.id

Lamun merupakan tumbuhan berbunga (*Angiospermae*) yang tumbuh terendam dalam air laut, memiliki rhizoma, daun dan akar sejati. Beberapa ahli juga mendefinisikan lamun (*seagrass*) sebagai tumbuhan air berbunga, hidup di dalam air laut, berpembuluh, berdaun, berimpang, berakar, serta berbiak dengan biji dan tunas (Duarte, 2002; Short *et al.* 2006). Lamun sebagai tumbuhan melakukan fotosintesis dalam proses pertumbuhannya. Kemampuan lamun dalam melakukan fotosintesis memanfaatkan karbondioksida (CO_2) dan menyimpannya dalam biomasa dikenal sebagai karbon biru (*blue carbon*). Pemanfaatan gas CO_2 dalam fotosintesis untuk tumbuhan yang hidup dalam air (lamun) memanfaatkan gas CO_2 yang terlarut dalam air. Beer *et al.* (2002) mengatakan bahwa dalam melakukan fotosintesis lamun memanfaatkan karbon inorganik yang terlarut di kolom air (*dissolved inorganic carbon/DIC*) sehingga lamun dapat mereduksi CO_2 .

Secara kimiawi penambahan CO_2 dari atmosfer ke dalam perairan laut terjadi dengan mekanisme perbedaan tekanan parsial antara atmosfer dan laut. Sistem CO_2 di perairan akan merubah CO_2 gas terlarut menjadi spesiasi H_2CO_3 , HCO_3^- , dan CO_3^{2-} yang disebut DIC. Kondisi pH laut yang umumnya 8,2 maka CO_2 terlarut sebesar 88 % berada dalam kondisi bikarbonat (HCO_3^-). Pemanfaatan bikarbonat (HCO_3^-) dalam fotosintesis lebih besar dibandingkan dengan spesiasi kimiawi sistem karbon lainnya. Menurut Short dan Neckles (1999) dan Beer *et al.* (2002) spesiasi inilah yang dimanfaatkan oleh sebagian besar lamun untuk fotosintesis.

Dinamika parameter sistem CO_2 seperti DIC di pesisir masih sangat kurang terutama di daerah tropis. Borges *et al.* (2009) mengatakan dinamika DIC dan fluks CO_2 antara atmosfer dan perairan pesisir sangat penting untuk diketahui sebagai bagian dari siklus laut secara regional dan global. Tetapi sampai saat ini pemahaman ini masih sangat kurang dibandingkan dengan siklus karbon pada laut terbuka dan lintang tinggi. Hal ini terkait dengan kompleksitas pemahaman siklus karbon pesisir seperti input dari sungai, interaksi sedimen dan kolom air. Walaupun demikian ekosistem pesisir merupakan habitat bagi tumbuhan berukuran besar seperti mangrove, lamun dan makro alga lainnya, sehingga penting mempelajari dinamika sistem DIC dan besarnya fluks CO_2 udara – laut di pesisir khususnya ekosistem lamun.

Indonesia memiliki luas lautan sebesar 17 % dari perairan laut dunia dengan produktivitas primer yang tinggi berpotensi menyerap CO_2 dari atmosfer terutama dimanfaatkan dalam karbon biru. Pemanfaatan CO_2 dalam mekanisme fotosintesis di perairan pesisir berpotensi dalam ekosistem *mangrove*, ekosistem lamun dan makroalga terutama budi daya rumput laut.

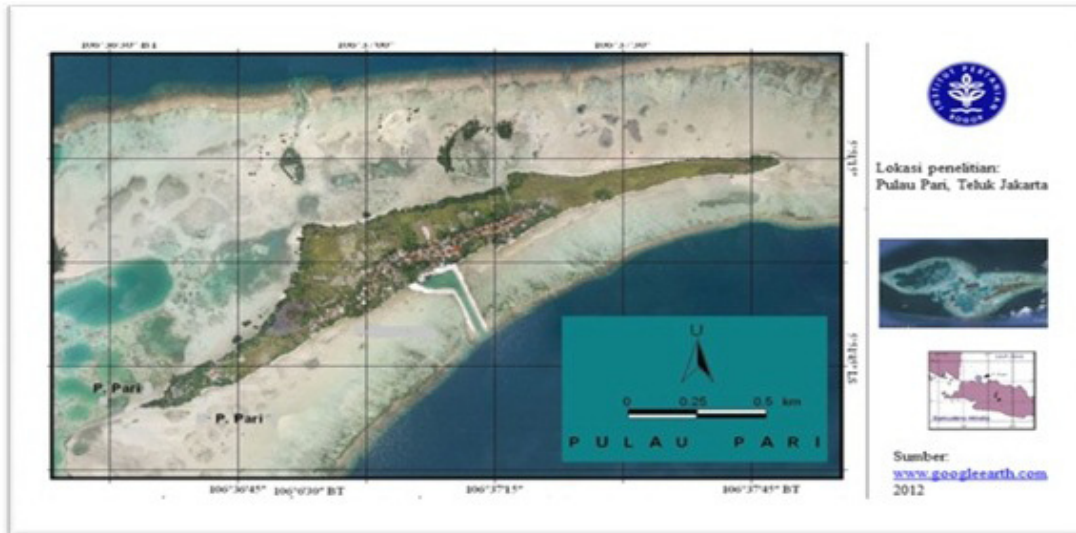
Indonesia memiliki luasan ekosistem mangrove dan ekosistem lamun terluas di dunia dan merupakan salah satu produsen rumput laut terbesar di dunia. Ekosistem lamun Pulau Pari merupakan ekosistem lamun yang cukup lengkap. Terdapat luasan lamun yang cukup luas di bagian selatan dengan tujuh spesies lamun yang ditemukan. Posisi Pulau Pari merupakan pulau terbesar dari 6 pulau yang terdapat di gugusan Pulau Pari yang terbentuk di rataan terumbu karang.

Tujuan penelitian ini mendapatkan dan menganalisa data DIC dan parameter lingkungan perairan ekosistem lamun Pulau Pari secara temporal mewakili musim barat, musim timur dan musim transisi di kolom air (*seawater*) dan di air poros (*pore water*). Analisis *sink* atau *source* CO_2 yang terjadi antara atmosfer dan air laut pada ekosistem lamun dengan mekanisme berdasarkan perbedaan tekanan parsial CO_2 .

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di ekosistem lamun Pulau Pari (Gambar 1). Pulau Pari merupakan pulau yang terbentuk di rataan terumbu karang bagian dari gugusan Pulau Pari. Sedimen yang terdapat di Pulau Pari umumnya pasir dan pasir pecahan karang. Pasir berlumpur biasa terdapat di ekosistem mangrove dan ekosistem lamun yang membentuk padang lamun yang cukup rapat. Pasang surut di Pulau Pari bertipe tunggal, yaitu dalam satu hari terjadi satu kali air pasang dan satu kali air surut. Pulau Pari berada di bagian luar Teluk Jakarta dengan jarak terdekat dengan daratan utama di Rawa Saban, Tangerang sejauh kurang lebih 20 km. Iklim di Pulau Pari terbagi atas dua musim yaitu musim barat yang biasanya dicirikan dengan tingginya curah hujan (musim hujan) antara Bulan Desember - Maret serta musim timur dicirikan dengan rendahnya curah hujan (musim kemarau) antara Bulan Juni – September selain itu ada musim transisi yang merupakan peralihan antara kedua musim tersebut.

Waktu pengambilan contoh air dilakukan sebanyak 7 kali yang mewakili musim barat (MB) pada Desember 2011 dan Februari 2012, musim timur (MT) pada Agustus 2011, September 2011 dan Juli 2012, musim peralihan antara MB ke MT pada Bulan Mei 2012 (MP I) dan musim peralihan antara MT ke MB pada Oktober 2011 (MP II). Pengukuran salinitas, pH, temperatur dan DO dilakukan secara *in situ* menggunakan multiparameter merek TOA DKK. Akurasi pengukuran pH secara *in situ* sebesar $\pm 0,01$ sedangkan di laboratorium pengukuran pH menggunakan pH meter 691 merk Metrohm buatan Swiss dengan akurasi sebesar $\pm 0,01$. Pasang surut didapat dari laboratorium data laut dan pesisir Puslitbang Sumberdaya Laut dan Pesisir, Balitbang KP selama penelitian. Pengukuran total padatan



Gambar 1. Lokasi penelitian Pulau Pari, Gugusan Pulau Pari, Kepulauan Seribu, Jakarta.

tersuspensi (TSS) dilakukan berdasarkan metode gravimetri sesuai dengan APHA, 2005. Parameter lingkungan lainnya yang dianalisa adalah nutrisi (fosfat dan silikat) dengan menggunakan alat spektrofotometer HACH DR-2000 sesuai APHA, 2005.

Pengambilan contoh air untuk pengukuran parameter CO₂ yaitu DIC (*Dissolved Inorganic Carbon*), total alkalinitas (TA) dan pH lab, sesaat setelah pengambilan sampel ditambahkan HgCl₂ pada sampel air untuk menghentikan aktivitas biologi dan sampel disimpan dalam *coolbox* yang selalu ditambahkan es batu agar suhu tetap rendah untuk mencegah terlepasnya CO₂ ke udara. Untuk analisis parameter CO₂, sampel kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman ukuran 0,45 µm dan hasil saringan ditempatkan pada botol berbahan borosilikat merk Duran 250 ml secara penuh tanpa gelembung udara untuk analisis lanjut (Dickson *et al.*, 2007). Pada studi ini DIC diukur menggunakan metode titrasi dengan prinsip berdasarkan pada perubahan pH setelah ditambahkan HCl dan NaOH pada sampel air yang telah disaring (Giggenbach & Goguel, 1989). DIC didapatkan dari penjumlahan CO₂, HCO₃⁻ dan CO₃²⁻ yang terdeteksi setelah ditambahkan HCl dan NaOH. Hasil pengukuran DIC dengan metode ini kemudian dikoreksi dengan hasil pengukuran *Certified Reference Material (CRM)* dari *Marine Physical Laboratory, University of California, San Diego* (Dickson, 2010). Nilai CRM DIC 2.021,65 ± 0,42 µmol/kg, sedangkan hasil pengukuran CRM di laboratorium 2028,44 µmol/kg, untuk CRM TA = 2.232,36 ± 0,84 dan hasil pengukuran CRM di laboratorium 2.230,33 µmol/kg.

Total alkalinitas diukur di laboratorium menggunakan metode titrasi (Anderson & Robinson, 1946; Dickson, 1981) dengan prinsip berdasarkan pada perubahan pH awal dan akhir pada 50 ml sampel (hasil

saringan), sebelum dan setelah ditambahkan HCl 0,01 N. Nilai akhir alkalinitas kemudian didapatkan dari suatu perhitungan. Komputasi pCO₂ sampel air laut dan air poros dilakukan dengan perangkat lunak CO2calc dengan menggunakan nilai pH, DIC dan TA serta parameter lingkungan seperti salinitas, temperatur, nutrisi (fosfat dan silikat) dan kedalaman (Robbin. *et al.*, 2010). CO2calc merupakan perangkat lunak untuk menganalisa pCO₂ dan fluks CO₂ pada air laut yang dikembangkan dari perangkat lunak sebelumnya CO2SYS (Lewis & Wallace, 1998; Pierrot, 2007).

Analisis yang dilakukan meliputi dinamika DIC, TA dan parameter lingkungan yang terukur baik di air laut (SW) maupun di air poros (PW). Perhitungan tekanan parsial CO₂ pada SW dan PW diturunkan dari parameter DIC, TA dan pH dengan menggunakan perangkat lunak CO2Calc. Analisis 'sink & source' CO₂ dilakukan untuk menentukan apakah suatu perairan penyerap atau pelepas CO₂. Analisis ini dilakukan dengan mengurangkan nilai pCO_{2air laut} dengan pCO_{2atmosfer} (rumus 1). Secara ideal pCO_{2atmosfer} didapatkan melalui pengukuran langsung secara simultan dengan pCO_{2air laut}. Namun karena keterbatasan peralatan, pCO_{2atmosfer} didapatkan dari pengukuran Stasiun Pemantau Atmosfer Global (SPAG) Bukit Koto Tabang, Bukit Tinggi Sumatera Barat milik Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) pada bulan yang sama dengan pengukuran. Rumus umumnya :

$$\Delta pCO_2 = pCO_{2air\ laut} - pCO_{2atmosfer} \dots\dots\dots 1)$$

Suatu perairan berperan sebagai *source* atau pelepas CO₂ ke udara / atmosfer jika nilai pCO₂-nya lebih tinggi dari nilai pCO_{2atmosfer} (nilai positif) karena akan terjadi aliran CO₂ dari air ke atmosfer dan sebaliknya berperan sebagai penyerap / *sink* CO₂ dari atmosfer jika nilai pCO₂-nya lebih rendah dari

$pCO_{2atmosfer}$ (nilai negatif).

Besaran nilai CO_2 yang dilepas atau diserap per satuan luas atau fluks antara atmosfer dan air laut didapat berdasarkan rumus sebagai berikut (Borges, 2004; Kone & Borges, 2008):

$$Fluks = k\alpha\Delta pCO_2 \dots\dots\dots 2)$$

Nilai k merupakan kecepatan transfer gas CO_2 dan pCO_2 yang diturunkan dari perhitungan kecepatan angin (u) yang didapat dari stasiun maritim Tanjung Priok dengan rumus sesuai Wanninkhof (1992) berikut ini:

$$k = 0,31 u^2 [Sc/660]^{-1/2} \dots\dots\dots 3)$$

Nilai α merupakan koefisien solubilitas gas CO_2 yang merupakan fungsi dari temperatur dan salinitas (Weiss, 1974). Selanjutnya fluks CO_2 antara atmosfer dan air laut dapat dihitung secara langsung dengan menggunakan perangkat lunak CO_2Calc dengan memasukkan parameter $pCO_{2atmosfer}$ dan kecepatan angin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Ekosistem Lamun Pulau Pari

Ekosistem lamun selama penelitian terdapat 7 spesies lamun yang ditemukan yaitu jenis *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Halodule uninervis*, *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata*, *Syringodium isoetifolium* dan *Halophila ovalis*. Lamun tersebar melimpah pada bagian sebelah selatan Pulau Pari terutama sisi sebelah barat yang membentuk hamparan padang lamun bertipe monospesies maupun campuran dengan luasan antara 100 m² – 10.000 m². Pulau Pari bagian utara lamun umumnya berbentuk spot – spot kecil yang hidup di antara karang. Tutupan lamun selama penelitian berkisar antara 3 – 85 %, dengan tutupan terbesar jenis *Thalassia hemprichii* diikuti dengan *Enhalus acoroides* dan *Cymodocea*

serrulata. Kisaran pasang surut selama penelitian di Pulau Pari berkisar antara 0,8 – 0,9 m.

Dinamika Parameter CO_2 dan Lingkungan

Nilai parameter CO_2 yang terdiri dari DIC, pH, TA dan pCO_2 berdasarkan musim di ekosistem lamun Pulau Pari selama penelitian pada air laut (SW) dan air poros (PW) dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1 memperlihatkan nilai parameter sistem CO_2 pada SW dan PW menurut musim. Nilai DIC dan pCO_2 umumnya lebih tinggi pada air poros daripada air laut. Nilai tertinggi pada musim timur, yang dilakukan pengukuran pada tiga bulan yang berbeda, nilai tertinggi pada Agustus 2011 sebesar 2.145,37 $\mu mol/kg$ dengan nilai yang terukur berkisar antara 2.094,48 – 2.145,37 $\mu mol/kg$ (Gambar 2). Nilai TA antara PW dan SW berfluktuasi, terlihat pada MB dan MP II nilai TA lebih besar di PW sedangkan pada MT dan MP I nilai TA lebih besar pada SW. Tekanan parsial CO_2 (pCO_2) di PW lebih tinggi daripada di SW. Berdasarkan perhitungan rumus 1, maka CO_2 di PW akan lepas ke kolom air yang akan mempengaruhi fluks air laut ke atmosfer. Frangkinouille (1988) mengatakan nilai DIC, temperatur, alkalinitas (TA) serta salinitas pada air poros akan mempengaruhi nilai pCO_2 di air poros yang akan mempengaruhi fluks yang terjadi di atmosfer dan laut. Korelasi positif yang cukup kuat antara pCO_2 di air poros (PW) akan mempengaruhi pCO_2 di SW dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa nilai pCO_2 di SW akan bertambah dengan bertambahnya nilai pCO_2 di PW ($R^2=0,410$).

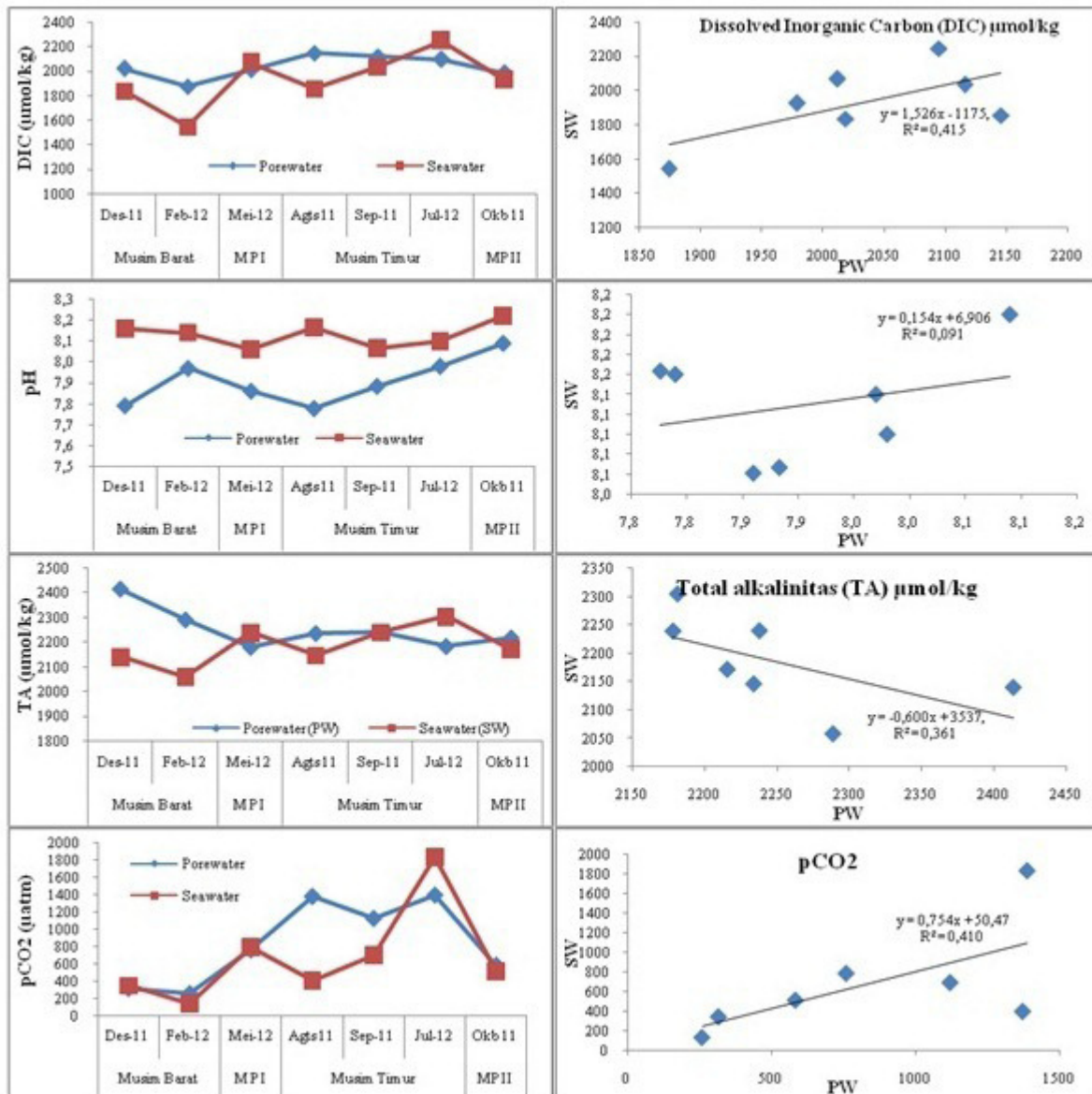
Gambar 2 memperlihatkan nilai dinamika parameter pada sistem CO_2 yaitu DIC, pH, TA dan pCO_2 pada air laut (SW) dan air poros (PW). Terlihat pada panel kanan nilai sebaran keempat parameter berfluktuasi berdasarkan waktu (musim) dengan kecenderungan nilai pada PW lebih tinggi daripada nilai pada SW, kecuali pada parameter pH nilai PW lebih rendah. Hubungan antara nilai parameter yang terukur pada air poros dan air laut terlihat pada Gambar

Tabel 1. Nilai parameter sistem CO_2 di ekosistem lamun Pulau Pari selama penelitian

Waktu	DIC ($\mu mol/kg$)		pH		TA ($\mu mol/kg$)		pCO_2 (μatm)	
	PW	SW	PW	SW	PW	SW	PW	SW
MB	1.946,21	1.689,79	7,88	8,15	2.351,401	2.098,938	287,677	241,5385
MP I	2.011,69	2.065,97	7,86	8,10	2.178,173	2.238,468	759,718	790,336
MT	2.118,63	2.044,28	7,88	8,11	2.217,773	2.229,576	1294,11	979,508
MP II	1.979,17	1.925,56	8,09	8,26	2.215,739	2.171,228	583,703	516,652

Keterangan: DIC = Dissolved Inorganic Carbon
 TA = Total Alkalinitas
 pCO_2 = tekanan parsial gas CO_2
 PW = air poros (porewater)
 SW = air laut (seawater)

MB = musim barat
 MP I = musim peralihan MB ke MT
 MT = musim timur
 MP II = musim peralihan MT ke MB



Gambar 2. Dinamika DIC, pH, TA dan pCO₂ selama 1 tahun pada air laut dan air poros ekosistem lamun P Pari.

2 panel kiri tidak terlihat adanya hubungan parameter pH di PW dengan pH di SW yang ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi yang sangat rendah yaitu sebesar $R^2 = 0,026$. Parameter DIC, TA dan pCO₂ terlihat ada hubungan cukup kuat antara PW dan SW. Hubungan korelasi positif untuk parameter DIC dan pCO₂, terlihat nilai PW bertambah maka nilai SW juga bertambah dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,415$ dan $0,41$. Hubungan korelasi negatif untuk parameter TA antara PW dan SW, terlihat nilai SW berkurang dengan bertambahnya nilai PW nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,361$.

Nilai DIC air laut di Pulau Pari pada musim barat yang dicirikan dengan curah hujan tinggi berkisar antara $1.543,66 - 1.835,91 \mu\text{mol/kg}$ dengan rata-rata $1.689,8 \mu\text{mol/kg}$. Nilai DIC ini lebih rendah dibandingkan

pada musim timur yang dicirikan dengan sedikitnya curah hujan yang terjadi atau musim kemarau yaitu berkisar $1.853,6 - 2.244,34 \mu\text{mol/kg}$ rata-rata sebesar $2.044,3 \mu\text{mol/kg}$. Nilai DIC di Pulau Pari lebih tinggi dibandingkan di Pulau Pisang dan Pulau Kepuh, Teluk Banten baik pada musim timur maupun musim barat (Tabel 1 dan Tabel 2). Secara keseluruhan nilai DIC musim barat lebih rendah dibandingkan pada musim timur. Hal yang sama didapatkan Kone & Borges (2008) pada ekosistem mangrove di Propinsi Ca Mau, Vietnam berkisar antara $1.556 - 1.907 \mu\text{mol/kg}$ pada musim hujan sedangkan pada musim kemarau berkisar antara $2.217 - 2.565 \mu\text{mol/kg}$. Musim transisi baik MP I maupun MP II di ekosistem lamun Pulau Pari nilai DIC lebih besar dibandingkan MB, dengan nilai berkisar $1.925,564 - 2.065,969 \mu\text{mol/kg}$.

Tabel 2. Nilai parameter sistem CO₂ di ekosistem lamun pada beberapa lokasi penelitian

Lokasi	Tahun	DIC ($\mu\text{mol/kg}$)	TA ($\mu\text{mol/kg}$)	pH	pCO ₂ (μatm)	Fluks ($\text{mmolC/m}^2/\text{hari}$)	Sumber
Pulau Pisang, Teluk Banten (Timur)	2009	1.854 - 1.893,3	-	8,21- 8,22	375,6 - 713,9	-	Adi & Rustam, 2010
Pulau Pisang, dan Pulau Kepuh Teluk Banten (Timur)	2010	1.605,16 dan 1.522,24	-	8,11 dan 8,09	281,9 dan 600	-	Rustam <i>et.al</i> 2010
Pulau Pisang dan Pulau Kepuh, Teluk Banten (Barat)	2010	1.668,6 dan 1.705,41	-	8,13 dan 8,1	261,7 dan 696,2	-	Rustam <i>et.al</i> 2012
Laguna Baja California, Meksiko	2005	1.800	-	-	-	-	Ribas-Ribas <i>et.al</i> , 2011
Teluk Palma, Mediterrania	2002	2.110 – 2.147	-	-	-	+1,1 sd +5,3 -0,4 sd -5,7	Gazeau <i>et.al</i> , 2005

Keterangan: DIC = Dissolved Inorganic Carbon
pCO₂ = tekanan parsial gas CO₂

TA = Total Alkalinitas
sd = sampai dengan

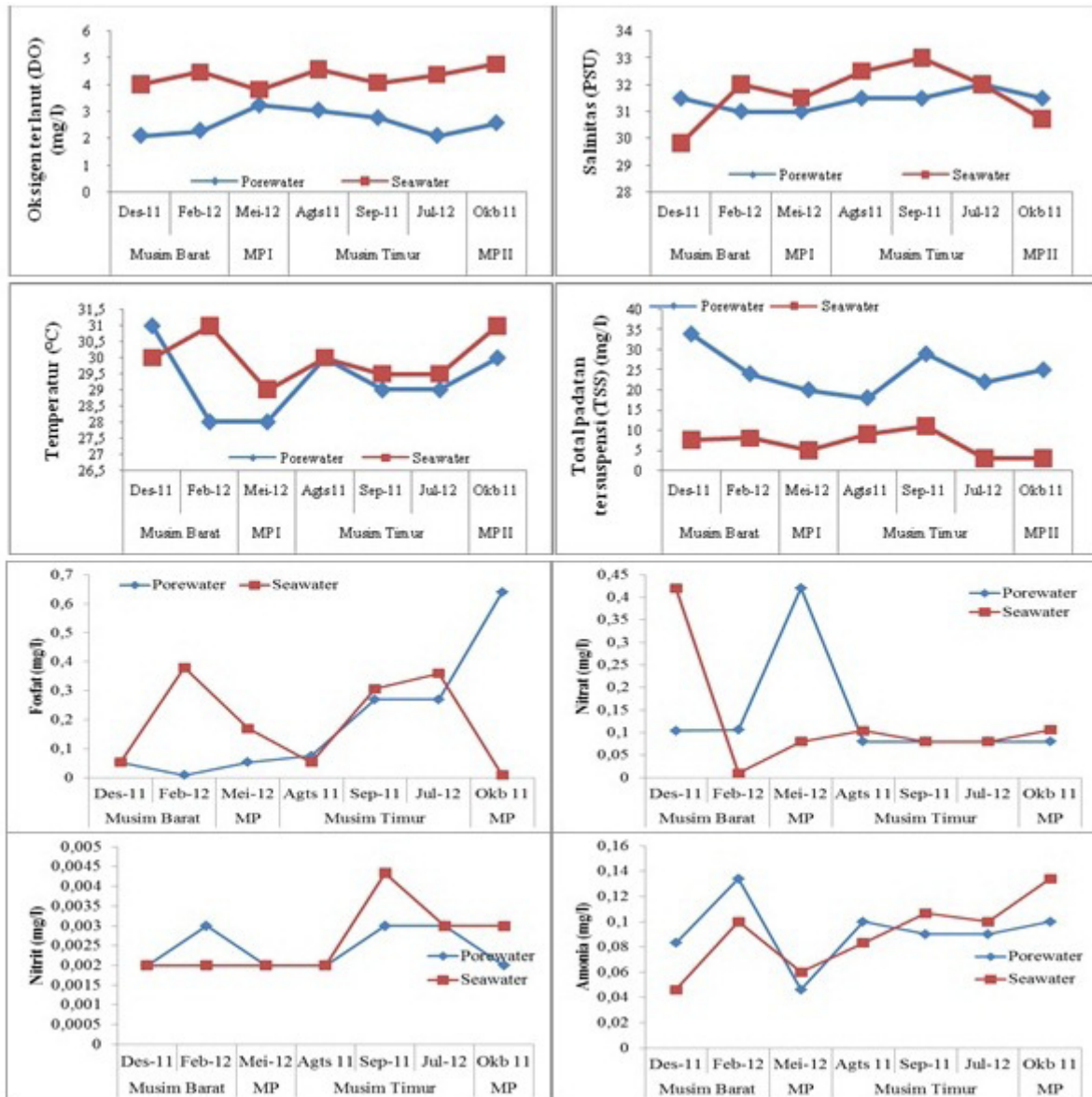
Nilai TA memiliki pola yang sama dengan DIC pada air laut, yaitu nilai TA tinggi pada musim timur dan rendah pada musim barat. Nilai TA pada air poros memiliki pola berkebalikan dengan nilai DIC pada air poros, terlihat nilai TA lebih tinggi pada musim barat dibandingkan pada musim timur dan musim transisi (MPI dan MPII) (Tabel 1). Nilai TA pada air laut musim barat di Pulau Pari lebih tinggi (2.098,938 $\mu\text{mol/kg}$) dibandingkan dengan Pulau Pisang dan Pulau Kepuh di Teluk Banten (1.996,3 $\mu\text{mol/kg}$ dan 1.865,5 $\mu\text{mol/kg}$). Musim timur lebih tinggi di Pulau Pisang pada Agustus 2009 (2.300 $\mu\text{mol/kg}$) dibandingkan Pulau Pari dan Pulau Kepuh. Secara keseluruhan nilai DIC dan TA berdasarkan musim memiliki pola yang sama yaitu musim barat nilai DIC dan TA rendah, musim timur tinggi. Kone & Borges (2008) mendapatkan pola yang sama dengan DIC yaitu nilai TA tinggi pada musim kemarau dan rendah pada musim hujan di ekosistem mangrove di Propinsi Ca Mau, Vietnam. Kone dan Borges (2008) mengatakan nilai rendahnya DIC dan TA pada musim hujan di ekosistem mangrove terkait dengan salinitas, yaitu pada musim kemarau tingginya temperatur menyebabkan tingginya proses penguapan sehingga salinitas tinggi, sebaliknya dengan musim hujan terjadi pengenceran dengan masuknya air dari sungai dan turunnya hujan sehingga salinitas rendah. Selain itu musim hujan diasumsikan banyaknya karbon organik yang masuk seharusnya menyebabkan nilai DIC tinggi tetapi hasil yang didapat rendah. Hal ini terkait dengan keberadaan oksigen dalam perairan pada musim hujan lebih bersifat aerob dibandingkan

pada musim kemarau cenderung bersifat anaerob sehingga aktivitas biologi memanfaatkan DIC lebih tinggi DIC di kolom air rendah.

Nilai pCO₂ yang didapat dari perhitungan CO₂calc dengan memakai parameter sistem CO₂ pH, DIC dan TA serta parameter lingkungan temperatur, salinitas, kedalaman dan nutrien (fosfat dan silikat) yang diukur selama penelitian baik secara *insitu* maupun yang terkoreksi di laboratorium. Dinamika pCO₂ terlihat pada Gambar 2 berfluktuasi antara PW dan SW dengan hubungan yang cukup kuat antara pCO₂ di PW dan SW ($R^2=0,410$). Terlihat nilai pCO₂ memiliki pola yang sama dengan DIC dan TA yaitu rendah pada musim barat dan tinggi pada musim timur. Musim transisi memiliki nilai di antara musim barat dan musim timur. Kone & Borges (2008) mendapatkan nilai pCO₂ di ekosistem mangrove (Propinsi Ca Mau, Vietnam) berkisar antara 704 – 11.481 ppm pada musim kemarau dan 1.209 – 8.136 ppm pada musim hujan.

Dinamika parameter lingkungan DO, salinitas, temperatur, TSS dan nutrien (fosfat, dan silikat) pada SW dan PW dapat dilihat pada Gambar 3.

Dinamika parameter lingkungan DO, salinitas, temperatur, TSS dan nutrien (fosfat, nitrat, nitrit dan amonium) pada Gambar 3 terlihat berfluktuasi setiap musimnya baik SW dan PW. Dari analisis regresi linear tunggal pada masing-masing parameter antara air poros dan air laut terlihat tidak ada hubungan yang



Gambar 3. Dinamika DO, salinitas, temperatur, TSS dan nutrisi (fosfat, nitrat, nitrit dan amonium) selama 1 tahun pada air laut dan air poros ekosistem lamun P Pari.

kuat baik pada air laut dengan air poros untuk semua parameter ($R^2 < 0,3$). Tidak adanya hubungan antara air laut dan air poros dapat disebabkan beberapa hal antara lain pengambilan air poros hanya pada lapisan permukaan yaitu kedalaman antara 0 -7 cm pada alat yang ditanam, serta tekstur sedimen di lokasi penelitian dominan pasir yaitu berkisar antara 77 – 96,6 %. Dominan substrat pasir di Pulau Pari disebabkan pulau ini terbentuk di rataan terumbu karang, substrat dominan berasal dari pecahan karang dan hewan bercangkang lainnya dan berukuran pasir (diameter 53 – 2.000 μ). Substrat berukuran lebih kecil seperti debu dan liat lebih banyak berasal dari suspensi terlarut yang berasal dari daratan atau remineralisasi substrat yang terendapkan karena terperangkap dalam ekosistem lamun ataupun ekosistem *mangrove*. Selain itu substrat dominan pasir memiliki porositas yang

tinggi sehingga interaksi antara air poros dan air laut di dekat dasar berlangsung cepat sehingga parameter yang terukur antara PW dan SW tidak terlihat ada hubungan yang kuat walaupun ada perbedaan nilai antara PW dan SW.

Analisis 'Sink' dan 'Source'

Gambar 4 menampilkan hasil selisih nilai pCO_2 air laut dan air poros dengan pCO_2 atmosfer (rumus 1). Tekanan parsial atmosfer didapat dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global milik BMKG yang berada di Koto Tabang, Bukit Tinggi pada bulan yang sama dengan pengambilan sampel.

Hasil analisis selisih antara pCO_2 (Gambar 4) menunjukkan pada musim barat baik pada Desember

2011 dan Februari 2011 ekosistem lamun berperan sebagai penyerap (*sink*) CO₂ dari atmosfer. Pada musim timur, ekosistem lamun berperan kuat sebagai pelepas (*source*) CO₂ ke atmosfer, begitu juga dengan musim transisi baik antara musim barat ke musim timur (MP I) ataupun sebaliknya (MP II).

Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk melihat hubungan yang mempengaruhi dinamika DIC, TA dan pCO₂ di wilayah studi selama penelitian. Analisis regresi linear sederhana dilakukan antara DIC, TA dan pCO₂ dengan parameter lainnya (pH, DO, temperatur, salinitas, nutrien) terpisah antara air poros dan air laut. Hasil korelasi yang cukup kuat pada air laut hanya pada temperatur sedangkan pada air poros hubungan yang cukup kuat terlihat pada TA dipengaruhi oleh TSS (Gambar 5).

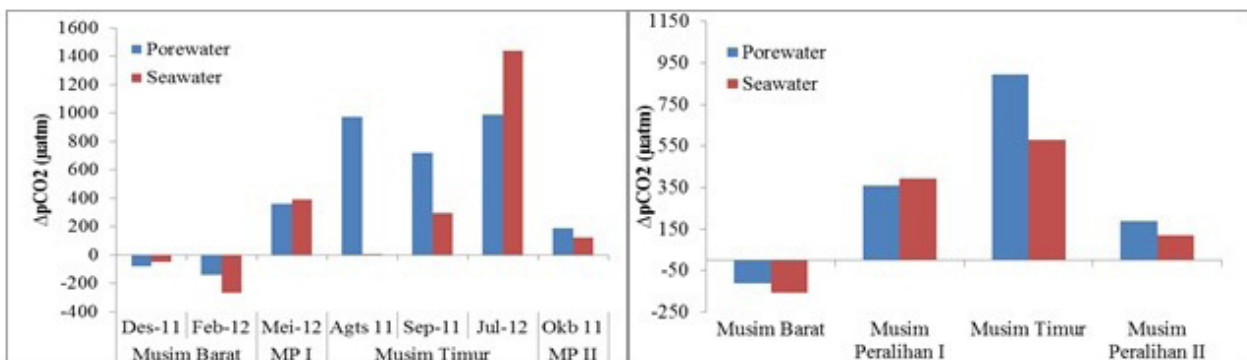
Nilai DIC dan TA pada air laut dipengaruhi temperatur dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,5301 dan 0,5654. Pengaruh temperatur mempengaruhi besarnya nilai koefisien solubilitas yang merupakan fungsi dari salinitas dan temperatur (Weiss, 1974). Selain itu rendahnya nilai DIC dan TA pada musim barat dapat disebabkan juga oleh besaran oksigen yang terlarut, serta pemanfaatan DIC

untuk fotosintesis produser terutama lamun. Walaupun pengaruh DO terhadap besaran nilai DIC dan TA tidak terlihat. Musim barat dicirikan dengan kuatnya angin yang bertiup dapat mempengaruhi besaran pergerakan arus yang terjadi di ekosistem lamun yang dapat menyebabkan proses fotosintesis dan respirasi tinggi sehingga nilai DIC rendah. Selain itu kuatnya angin mempengaruhi besarnya pCO₂ di air dan fluks yang terjadi terkait dengan kecepatan transfer gas CO₂ yang merupakan fungsi dari kecepatan angin (rumus 3).

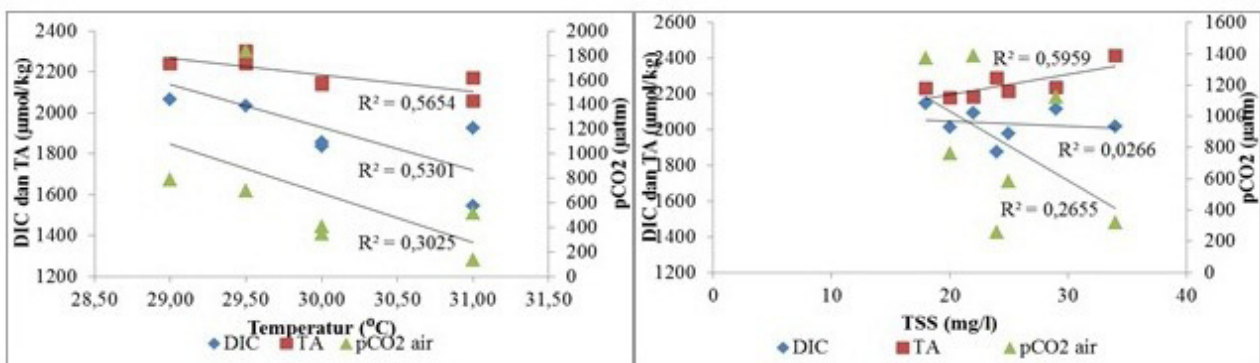
Fluks CO₂ Air Laut – Atmosfer Ekosistem Lamun Pulau Pari

Analisis fluks CO₂ yang dihitung menurut rumus (2), menjelaskan besaran fluks yang terjadi dari air laut ke atmosfer. Fluks CO₂ terkait erat dengan selisih pCO₂ (rumus 1) dan besarnya kecepatan angin. Parameter terkait dengan besaran fluks dapat dilihat pada Gambar 6.

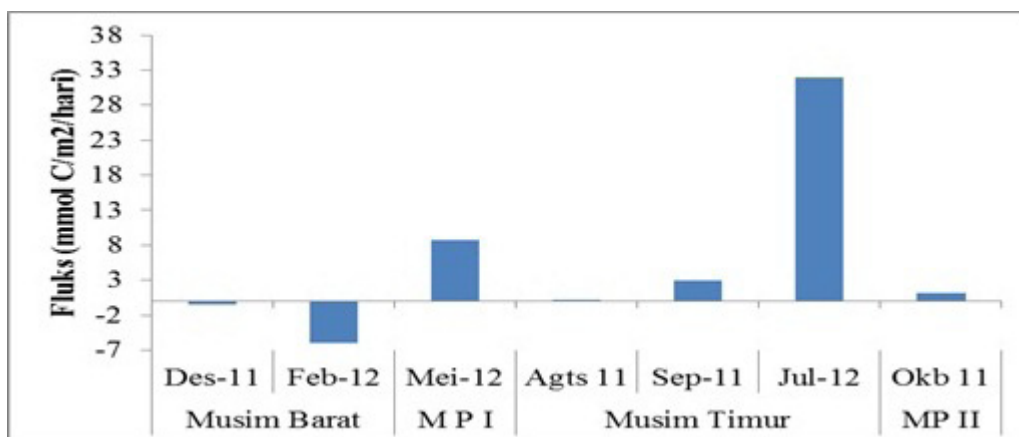
Gambar 6 menunjukkan besaran fluks yang terjadi selama penelitian, terlihat ekosistem lamun berperan menyerap (*sink*) CO₂ dari atmosfer pada musim barat dengan besar fluks antara 0,502 – 5,971 mmol C/m²/hari. Musim timur dan musim peralihan



Gambar 4. Perbedaan konsentrasi pCO₂ air laut/air poros – pCO₂ atmosfer (panel kiri) dan panel kanan perbedaan konsentrasi pCO₂ air laut/air poros – pCO₂ atmosfer untuk rata-rata setiap musim).



Gambar 5. Korelasi parameter DIC, TA dan pCO₂ dengan temperatur pada air laut (panel kiri atas); korelasi parameter DIC, TA dan pCO₂ dengan TSS pada air poros (panel kanan atas).



Gambar 6. Fluks CO₂ air laut – atmosfer ekosistem lamun Pulau Pari selama penelitian.

ekosistem lamun berperan sebagai pelepas (*source*) CO₂ ke atmosfer dengan kisaran antara 0,044 – 32,026 mmol C/m²/hari. Fluks CO₂ antara atmosfer dan air laut tertinggi pada musim timur pada Juli 2012 sebesar 32,026 mmol C/m²/hari. Dari penelitian yang sudah ada, perairan pesisir daerah tropis umumnya bersifat sebagai pelepas karbon ke atmosfer berdasarkan mekanisme pertukaran gas CO₂ antara atmosfer dan air laut, tetapi perlu diperhitungkan pula keberadaan keragaman pesisir (vegetasi lamun, *mangrove* dan makro alga) yang berperan dalam menyerap CO₂ dari atmosfer sehingga diperlukan perhitungan ulang dalam anggaran karbon secara global (Borges *et al.*, 2005). Berperannya ekosistem lamun sebagai pelepas CO₂ pada hal ini dapat disebabkan banyak faktor, diantaranya Pulau Pari berada di Teluk Jakarta yang bermuara 13 sungai besar dari daratan. Sungai-sungai tersebut membawa bahan organik yang sangat besar yang akan mempengaruhi karbon organik dan inorganik yang terlarut di dalam air selain itu tambahan karbon organik dari serasah lamun maupun tanaman pesisir lainnya seperti *mangrove* dan rumput laut.

Bouillon & Connoly (2009) mengatakan sungai tropis menyumbang sebesar 60 % karbon organik dan inorganik dari benua ke zona pesisir kemudian berpindah ke perairan laut terbuka. Selama di pesisir besarnya karbon dipertukarkan secara langsung sebagai partikel atau bahan terlarut atau dalam mekanisme rantai makanan yang sangat dinamis selain itu berpotensi tersimpan dalam mekanisme karbon biru yang dapat tersimpan dalam ribuan tahun. Sehingga peran ekosistem lamun sebagai pelepas gas CO₂ perlu diperhitungkan kembali dan kemungkinan besar disebabkan tingginya masukan karbon antropogenik dari daratan yang terbawa sungai. Potensi lamun sebagai karbon biru dapat berperan sebagai penyerap CO₂ serta menyimpannya dalam biomassa terutama pada biomassa bagian bawah perlu diperhitungkan kembali sebagai bagian dari siklus karbon regional maupun global.

KESIMPULAN

Dinamika DIC dan parameter CO₂ lainnya yaitu pH, TA dan pCO₂ pada air laut dan air poros di ekosistem lamun Pulau Pari berfluktuasi setiap musimnya. Nilai DIC, TA dan pCO₂ umumnya tertinggi pada musim timur dan terendah pada musim barat dengan nilai lebih besar umumnya pada air poros dibandingkan air laut. Nilai pH pada air poros lebih tinggi dari air laut terkait erat dengan keberadaan oksigen yang terlarut. Faktor yang mempengaruhi nilai DIC dan TA pada air laut adalah temperatur yang akan mempengaruhi besaran pCO₂ dan solubilitas gas CO₂. Sedangkan faktor yang mempengaruhi DIC, TA dan pCO₂ pada air poros adalah TSS. Hubungan parameter yang di air poros dan air laut umumnya tidak terlihat hubungan yang signifikan. Hal ini terkait dengan substrat yang ada di ekosistem lamun Pulau Pari dominan pasir sehingga memiliki nilai porositas yang tinggi mengakibatkan interaksi antara air laut dan air poros sangat cepat. Musim barat ekosistem lamun Pulau Pari berperan sebagai penyerap (*sink*) dengan fluks sebesar 3,237 mmolC/m²/hari. Musim timur dan musim transisi berperan sebagai pelepas CO₂ dengan fluks tertinggi pada musim timur sebesar 11,669 mmolC/m²/hari.

Peran ekosistem lamun sebagai pelepas karbon lebih disebabkan banyaknya karbon antropogenik yang masuk ke perairan pesisir dari daratan ditambah dengan karbon berasal dari serasah tanaman pesisir seperti lamun, *magrove* dan rumput laut. Terlepas dari peran sebagai pelepas karbon, ekosistem lamun berperan sebagai penyerap karbon dan menyimpannya dalam biomassa dalam mekanisme karbon biru. Selain itu peranan ekosistem lamun sebagai penyedia jasa dan barang bagi biota lainnya sangat besar dan penting bagi ekosistem pesisir dan ekosistem laut terbuka.

PERSANTUNAN

Tulisan ini merupakan bagian dari hasil penelitian tugas akhir (disertasi) penulis. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan atas beasiswa dan kesempatan melanjutkan sekolah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, N.S. & Rustam, A. (2010). Study Awal Pengukuran System CO₂ di Teluk Banten, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan VI ISOI 2009, ISBN: 978-979-98802-5-3, 17 halaman.
- Anderson, D.H. & Robinson, R.J. (1946). Rapid Electrometric Determination of the Alkalinity of Sea Water. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, Vol. 18, p767-769.
- APHA. (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, M.A.N. Franson (ed.), Port City Press, Baltimore (MA).
- Beer, S., Bjork, M., Hellblom, F. & Axelsson, L. (2002). Inorganic carbon utilization in marine angiosperms (seagrass). *Funct. Plant Biol* 29: 349 - 354.
- BMKG., Stasiun Pemantau Atmosfer Global. (2013). Data CO₂ atmosfer <http://gaw-kototabang.com/hal.php?hal=co2> [7 juni 2013]
- Borges, A.V. (2005). Do We Have Enough Pieces of the Jigsaw to Integrate CO₂ Fluxes in the Coastal Ocean?. *Estuaries* Vol. 28, No. 1, p. 3–27.
- Borges, A.V., Delile, B. & Frankignoulle, M. (2005). Budgetting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystems counts. *Geophysical Research Letter*.
- Borges, A.V., Alin S.R., Chavez F.P., Vlahos P., Johnson K.S., Holt J.T., Balch W.M., Bates N., Brainard R., Cai W.-J., Chen C.T.A., Currie K., Dai M., Degrandpre M., Delille B., Dickson A., Evans W., Feely R.A., Friederich G.E., Gong G.-C., Hales B., Hardman-Mountford N., Hendee, J., Hernandez-Ayon J.M., Hood M., Huertas E., Hydes D., Ianson D., Krasakopoulou E., Litt E., Luchetta A., Mathis J., McGillis W.R., Murata A., Newton J., Ólafsson J., Omar A., Perez F.F., Sabine C., Salisbury J.E., Salm R., Sarma V.V.S.S., Schneider B., Sigler M., Thomas H., Turk D., Vandemark D., Wanninkhof R., & Ward B. (2009). A global sea surface carbon observing system: inorganic and organic carbon dynamics in coastal oceans.
- Borges, A.V. (2011). Present day carbon dioxide fluxes in the coastal ocean and possible feedback under global change. Chapter 3. Duarte P & Santana-Casiano, J.M. Ocean and the atmospheric carbon content. Springer science+Business Media B.V. DOI. 10.1007/978-90-48-9821-4_3
- Bouillon, S. & Connoly, R.M. (2009). Carbon exchange among tropical coastal ecosystems. Chapter 3. Nagelkerken, I (editor). Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems. Springer. Netherland
- Cai, W.J., Dai, M. & 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.
- Dickson, A.G. (1981). An exact definitio of total alkalinity and a procedure for the estimation of alkalinity and total inorganic carbon from titration data. *Deep sea research (28A)* No. 6 609-623. Pergamon press. Inggris
- Dickson, A.G., Sabine, C.L. & Christian, J.R. (Eds). (2007). Guide to Best Practice for Ocean CO₂ Measurements. PICES Special Publication 3, 191p
- Dickson, A.G. (2010). Certificate of Analysis: Reference material for oceanic CO₂ measurement. University of California, San Diego
- Duarte, C.M. (2002). The future of seagrass meadow. *Env Cons* 29 (2):192 -206. doi: 10.1017/S0376892902000127
- Fletcher, S.E.M., Gruber, N., Jacobson, A.R., Doney, S.C., Dutkiewicz, S., Gerber, M., Follows, M., Joos, F., Lindsay, K., Menemenlis, D., Mouchet, A., Muller, S.A. & Sarmiento, J.L. (2006). Inverse Estimates of Anthropogenic CO₂ uptake, transport and storage by the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.20. Doi: 10.1029/2005GB002530
- Frankignoulle, M. (1988). Field measurement of air – sea CO₂ exchange. *Limnol. Oceanogr.*, 33(3). 313-322
- Gazeau, F; Duarte, C.M.; Gattuso, J.P.; Barron, C.; Navarro, N.; Ruiz, S.; Prairie, Y.T.; Calleja, M.; Delille, B.; Frankignoulle, M. & Borges, A.V. (2005). Whole-system metabolism and CO₂ fluxes in a Mediterranean Bay Dominated by Seagrass Beds (Palma Bay, NW Mediterraean. *Biogeoscience* 2: 43-60 www.biogeosciences.net [18 Oktober 2009]

- Giggenbach, W.F & Goguel R.L. (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.
- Konec', Y.J.-M. & Borges, A.V. (2008). Dissolved inorganic carbon dynamics in the waters surrounding forested mangroves of the Ca Mau Province (Vietnam). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 77 (2008) 409e421
- Lewis, E., & Wallace, D.W.R. (1998). Program Developed for CO₂ System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- Pierrot, D. (2007). Quick start guide CO₂sys Excel Macro. <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html> [3 oktober 2011]
- Ribas-Ribas, M., Hernández-Ayón, J.M., Camacho-Ibar, V.F., Cabello-Pasini, A., Mejia-Trejo, A., Durazo, R., Galindo-Bect, S., Souza, A.J., Forja, J.M. & Siqueiros-Valencia, A. (2011). Effect of upwelling, tides and biological processes on the organic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* xxx (2011) 1 – 10. Doi: 10.1016/j.ecss.2011.09.017
- Robbin, L.L., Hansen, M.E., Kleypas, J.A & Meylan, S.C. (2010). A User-Friendly Seawater Carbon Calculator for Windows, Mac OSX and iOS (iPhone). Florida Shelf Ecosystems Response to Climate Change Project. U.S Geological Survey, Reston, Virginia. <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1280/>
- Rustam, A., Adi, N.S., Purbani, D. & Mustikasari, E. (2012). Parameter system karbon di Teluk Banten kaitannya dengan kesuburan perairan. *Prosiding Seminar Nasional Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan 2012*. ISSN: 1412 2332
- Short, F.T. & Neckles, H.A. (1999). The effect of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany* (63) 169-196. Elsevier
- Short, F.T., McKenzie, L.J., Coles, R.G., Vidler, K.P., Gaeckle, J.L. (2006). *SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat*, Worldwide edition. University of New Hampshire Publication. 75
- Wanninkhof, R. (1992). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of geophysical research* vol 97 no C5, 7373 – 7382.
- Weiss, R.F. (1974). Carbondioxide in water and seawater: the solubility of a non ideal gas. *Marine chemistry* 2, 203 – 215. Elsevier.