

FLUKS CO₂ DI PERAIRAN PESISIR TIMUR PULAU BINTAN, PROPINSI KEPULAUAN RIAU

Faridz R. Fachri¹⁾, Afdal²⁾, A. Sartimbul¹⁾ & N. Hidayati¹⁾

¹⁾Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya

²⁾Pusat Penelitian Oseanografi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2O-LIPI)

Diterima tanggal: 22 Januari 2015; Diterima setelah perbaikan: 29 April 2015; Disetujui terbit tanggal 8 Juni 2015

ABSTRAK

Proses pertukaran CO₂ yang terjadi antara permukaan air laut dengan atmosfer merupakan aspek yang penting terhadap siklus karbon di samudera. Wilayah pesisir memiliki kontribusi besar dalam proses ini, karena kompleksnya interaksi yang terjadi antara atmosfer, daratan dan lautan. Proses penting dalam dinamika gas CO₂ antara atmosfer dan air laut diawali dengan fungsi daya larut CO₂ dan kecepatan transfer gas CO₂ di permukaan laut atau disebut fluks CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fenomena fluks CO₂ antara permukaan air laut dengan atmosfer di pesisir timur Pulau Bintan beserta komponen sink dan source-nya, serta mengetahui parameter yang paling dominan terhadap proses tersebut, meliputi parameter fisika-kimia oseanografi, serta parameter sistem CO₂ pada kurun waktu 16-18 Maret 2013. Permodelan OCMIP digunakan untuk mengidentifikasi nilai pCO₂ air laut dalam penentuan nilai fluks CO₂. Hasil analisis menunjukkan secara keseluruhan perairan pesisir timur Pulau Bintan berperan sebagai penyerap CO₂ (*sink*) dengan rata-rata emisi CO₂ dari atmosfer yang masuk ke wilayah permukaan laut sebesar -0,43 mmolC/m²/hari. Analisis statistik *Principal Component Analysis* (PCA) menunjukkan parameter yang dominan terhadap perubahan nilai fluks CO₂ adalah salinitas, konsentrasi *Dissolved Inorganic Carbon* (DIC), pCO₂ air laut, serta nilai selisih tekanan parsial CO₂ antara air laut dengan atmosfer (ΔpCO_2). Kondisi fluks CO₂ di pesisir timur Pulau Bintan lebih dipengaruhi oleh variasi musim dan dinamika oseanografi perairan Natuna serta Laut Cina Selatan dibandingkan dengan pengaruh dari daratan.

Kata kunci: OCMIP, pCO₂, fluks CO₂, PCA, Perairan Pesisir Timur Pulau Bintan

ABSTRACT

The process of CO₂ exchange that occurs between sea surface and atmosphere is an important aspect due to carbon cycle in the ocean. The coastal area has a major contribution in this process, because a complex interactions has been happened between atmosphere, land and oceans. The important processes in dynamics of CO₂ between sea water and atmosphere are the solubility of CO₂ and the velocity of CO₂ gas transfer in the sea surface, called CO₂ flux. This present study was aimed to determine the CO₂ flux between sea surface and atmosphere, include sink-source component in east coast of Bintan Island, afterward to know the most dominant parameter in that process, including physico-chemical oceanography parameters and CO₂ system parameters on the period from 16-18 March 2013. The OCMIP modeling was used to identify pCO₂ of sea water in determining CO₂ flux value. The analysis showed that as a whole, east coast of Bintan Island has role as CO₂ sink with emissions average of CO₂ gases that transferred from the atmosphere into the sea surface is -0.43 mmolC/m²/day. The Principal Component Analysis (PCA) showed the dominant parameters to changes CO₂ flux value are salinity, Dissolved Inorganic Carbon (DIC) concentration, pCO₂ of sea water, and differential partial pressure of CO₂ between sea water and atmosphere (ΔpCO_2). CO₂ flux conditions on the east coast of Bintan Island is more affected by seasonal variations and oceanographic dynamics in Natuna waters and the South China Sea compared to the mainland influence.

Keywords: OCMIP, pCO₂, CO₂ flux, PCA, East Coast of Bintan Island

PENDAHULUAN

Konsentrasi CO₂ global dan konsentrasi CO₂ ekuivalen merupakan indikator ukuran gas rumah kaca di atmosfer (Reid *et al.*, 2011; Buddemeier *et al.*, 2004). Total jumlah karbon di laut diperkirakan 50 kali lebih besar dibandingkan jumlah karbon yang ada di atmosfer, diperkirakan pada tahun 2050 konsentrasi CO₂ di laut mencapai 463-623 ppmv (McCharty *et al.*, 2001; IPCC dalam Afdal, 2007). Sejak awal revolusi industri, lautan telah menyerap sekitar 30% dari tambahan CO₂ di atmosfer yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Pada tahun 2007 saja diperkirakan 2,3 milyar ton CO₂ diserap oleh lautan (Reid *et al.*, 2011).

Wilayah laut yang mempunyai peran penting dalam proses pertukaran CO₂ atmosfer-laut adalah perairan pesisir. Perairan pesisir memainkan peranan

utama dalam siklus biogeokimia, dikarenakan pertukaran CO₂ atmosfer-laut di wilayah ini terjadi cukup intensif dan dapat mempengaruhi dinamika fluks CO₂, meskipun hanya mempunyai luas kurang dari 7% total luas lautan dunia dan mempunyai volume kurang dari 0,5% volume lautan global (Chen & Borges, 2009; Gattuso *et al.*, 1998; Borges *et al.*, 2005). Secara umum peranan laut dalam proses siklus karbon global ada dua; 1. Laut menyerap kelebihan CO₂ di atmosfer, dan 2. Mengalami perubahan secara fisik, kimia, dan biologi. Lautan menyerap kelebihan CO₂ dalam tiga langkah proses dimulai dari gas CO₂ melewati permukaan antara perbatasan atmosfer dengan air, bereaksi kimia dengan karbon anorganik terlarut di permukaan air laut, dan setelah itu diangkut ke dalam perairan yang lebih dalam melalui peristiwa *physical pump* dan *biological pump* (JGOFS, 2000; Sulzman, 2000).

Korespondensi Penulis:

Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta Utara 14430. Email: faridz_ub@yahoo.com

Karbon dioksida yang terlarut di dalam air laut (*Dissolved Inorganic Carbon/DIC*) ditemukan dalam tiga bentuk utama, yaitu senyawa H_2CO_3 (kurang lebih 1% dari jumlah total), ion CO_3^{2-} (kurang lebih 8%) dan ion HCO_3^- (kurang lebih 91%) (IPCC, 2001). Fungsi daya larut CO_2 dan kecepatan transfer gas CO_2 yang terjadi di permukaan laut disebut sebagai fluks CO_2 . Penelitian mengenai fluks CO_2 di wilayah perairan tropis masih sangat jarang dilakukan jika dibandingkan dengan penelitian tentang fluks CO_2 di perairan terbuka dan lintang tinggi. Hal ini dikarenakan kompleksnya pemahaman siklus karbon di pesisir (Rustam *et al.*, 2014), serta riset tentang karbon masih menjadi topik bahasan baru di Indonesia. Padahal siklus karbon memiliki peranan yang besar bagi kelangsungan hidup biota perairan kaitannya terhadap fenomena perubahan iklim.

Pulau Bintan merupakan salah satu pulau yang terletak di antara Selat Malaka dan Selat Karimata berhadapan secara langsung dengan Laut Cina Selatan serta memiliki ekosistem laut tropis yang lengkap. Letak geografis ini menjadikan dinamika perairan Pulau Bintan sangat kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fluks CO_2 antara permukaan air laut dengan atmosfer di pesisir timur Pulau Bintan beserta komponen *sink* dan *source*-nya, serta mengetahui parameter yang paling dominan terhadap proses tersebut, meliputi parameter fisika-kimia oseanografi, serta parameter sistem CO_2 .

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di perairan pesisir timur Pulau Bintan pada bulan Maret-April 2013. Uji penentuan fluks CO_2 dilaksanakan di Laboratorium Produktifitas Primer dan Laboratorium Kimia Hara, Pusat Penelitian Oseanografi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2O-LIPI), Ancol, Jakarta.

Prosedur Pengambilan Sampel

Proses pengambilan sampel air laut dilakukan pada tanggal 16-18 Maret 2013 (musim peralihan), yang tersebar pada 27 titik pengamatan. Sampel air laut diambil dengan menggunakan *Van Dorn water sampler* pada kedalaman kurang lebih 0-1 meter dari permukaan air laut. Air sampel kemudian dimasukkan kedalam botol sampel dan ditetesi dengan larutan $HgCl_2$ untuk menghentikan aktivitas biologi. Botol yang berisi sampel air di masukkan kedalam *cool box* agar suhu tetap rendah untuk mencegah terlepasnya CO_2 ke atmosfer. Kemudian analisis lebih lanjut dilakukan di laboratorium.

Pengukuran Parameter Fisika-Kimia Oseanografi Perairan

Parameter fisika-kimia oseanografi yang diukur dalam penelitian ini meliputi suhu permukaan air laut, salinitas, serta konsentrasi nutrien perairan (silikat dan fosfat). Nilai suhu permukaan dan salinitas didapatkan dengan menggunakan alat *Salino Conductivity Temperature*, untuk nilai nutrien perairan yaitu silikat dan fosfat digunakan metode Strickland & Parson (1968) dengan menggunakan *spectofotometer* tipe SHIMADZU UV-1201V. Panjang gelombang yang digunakan adalah 810 nm untuk silikat dan 885 nm untuk fosfat.

Pengukuran Sistem CO_2

Proses pengukuran nilai fluks CO_2 di perairan laut menurut Lewis & Wallace (1997) harus mengetahui terlebih dahulu empat parameter yang termasuk dalam sistem CO_2 , yaitu DIC, alkalinitas total, pH dan tekanan parsial CO_2 (pCO_2).

• DIC

Analisis DIC atau karbon anorganik terlarut menggunakan metode titrimetri (Giggenbach & Goguel, 1989). Metode titrimetri ini berprinsip pada perubahan nilai pH setelah ditambahkan HCl dan NaOH. Nilai DIC didapatkan dari menjumlahkan konsentrasi HCO_3^- dan CO_3^{2-} yang terdapat pada air sampel yang telah disaring (Afdal *et al.*, 2011).

$$[CO_3^{2-}] = \frac{60092 (A \times NHCl - D \times NNaOH)}{V_s}$$

$$[HCO_3^-] = \frac{61061 (B \times NHCl - C \times NNaOH)}{V_s}$$

Keterangan:

- A dan B = Volume HCl yang digunakan untuk menurunkan pH
- C dan D = Volume NaOH yang digunakan untuk menaikkan pH
- Vs = Volume sampel air laut yang dianalisis

• Alkalinitas Total (TA)

Nilai dari total alkalinitas dihitung dengan menggunakan metode titrasi (Grasshof, 1976). Prinsip metode ini berdasarkan 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 rumus dibawah ini (Adi & Rustam, 2010).

$$TA = \frac{1000 \times V_{HCl} \times t_{HCl}}{V_b} - \frac{1000 \times V_{NaOH} \times t_{NaOH}}{V_b}$$

Keterangan:

V = Volume HCl dan NaOH

T = Molaritas HCl dan NaOH

Vb = Volume sampel

- Tekanan Parsial CO₂ (pCO₂) Atmosfer dan Air Laut

Nilai tekanan parsial CO₂ atmosfer (pCO₂ atmosfer) didapatkan dari nilai konsentrasi gas CO₂ di atmosfer yang telah terekam dalam alat CO₂ meter. Sedangkan penentuan nilai tekanan parsial CO₂ air laut didapatkan dari hasil turunan dari parameter DIC, alkalinitas dan pH dengan menggunakan model OCMIP (*Ocean Carbon Cycle Intercomparison Project*) yang dikembangkan oleh Orr et al., (1999).

Perhitungan Fluks CO₂

Penentuan nilai fluks CO₂ membutuhkan beberapa data untuk menentukan nilai kecepatan transfer gas CO₂ sesuai yang dikembangkan oleh Wanninkhof (1992), seperti data kecepatan angin 10 meter diatas permukaan air laut dan suhu permukaan laut. Data angin didapatkan dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) Tanjung Pinang, Pulau Bintan. Komponen *sink-source* CO₂ diketahui dengan mencari selisih antara nilai pCO₂ air laut dengan pCO₂ atmosfer atau sering disebut ΔpCO₂ (persamaan 1). Jika nilai ΔpCO₂ adalah positif (+), maka CO₂ akan diemisikan dari permukaan air laut menuju atmosfer sehingga perairan tersebut berperan sebagai *source* CO₂, dan jika nilainya negatif (-), maka yang terjadi adalah sebaliknya. Nilai fluks CO₂ didapatkan dengan memasukkan nilai ΔpCO₂, kecepatan transfer gas CO₂ atau K (persamaan 2), dan *Schmidt number* CO₂ di air laut atau Sc (persamaan 3) kedalam persamaan (4) sesuai penelitian yang dilakukan oleh Takahashi et al., (2008).

$$\begin{aligned} \Delta pCO_2 &= pCO_{2(\text{air laut})} - pCO_{2(\text{atmosfer})} \dots\dots\dots 1) \\ K &= 1,09 \times U_{10} - (0,333 \times U_{10}^2) + (0,078 \times U_{10}^3) \times (Sc/660)^{1/2} \dots\dots 2) \\ Sc &= 2073,1 - (125,62 \times t) + (3,63 \times t^2) - (0,43 \times t^3) \dots\dots\dots 3) \\ \text{Fluks CO}_2 &= K \cdot \alpha \cdot \Delta pCO_2 \dots\dots\dots 4) \end{aligned}$$

Keterangan:

K = Kecepatan transfer gas CO₂ (Wanninkhof, 1992)

U10 = Kecepatan angin 10 meter diatas permukaan air laut

Sc = Schmidt number CO₂ di air laut

t = suhu permukaan laut (SST)

α = Koefisien daya larut CO₂ (fungsi dari temperatur dan salinitas) (Weiss, 1974)

Penentuan Parameter Fisika-Kimia Oseanografi dan Sistem CO₂ yang Dominan Terhadap Perubahan Nilai Fluks CO₂

Principal Component Analysis (PCA) merupakan metode analisis statistik yang digunakan untuk mengetahui pengaruh parameter fisika-kimia oseanografi dan sistem CO₂ terhadap variasi fluks CO₂. Model logaritma PCA ini digunakan untuk melakukan penyederhanaan set data dengan dimensi yang tinggi menjadi dimensi yang lebih sederhana untuk keperluan analisis data, visualisasi, ekstraksi (*feature extraction*), kompresi atau pemampatan data (*data compression*) (Raiko et al., 2002). Keuntungan dari analisis ini dapat menyederhanakan data dan mengklasifikasi data lebih cepat (Blei, 2008).

Hasil dari analisis PCA ini akan menunjukkan parameter-parameter atau variabel penelitian yang berperan penting. Sehingga dari seluruh parameter penelitian nanti diketahui parameter yang paling dominan dan berpengaruh dalam penentuan nilai fluks CO₂ yang dapat dilihat pada nilai di tiap komponennya. Selain itu juga dilakukan analisis standardize index untuk membantu proses analisis data dan mendukung hasil dari analisis PCA. Analisis ini didapatkan dengan menggunakan persamaan: (xi - x) / sd, 'xi' mewakili data orisinal, 'x' nilai rata-rata dan 'sd' standar deviasi, seperti yang dilakukan oleh (Sartimbul et al., 2007).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Kondisi Fisika-Kimia Oseanografi Pesisir Timur Pulau Bintan

Secara geografis posisi Pulau Bintan sangat strategis yaitu di ujung Selat Malaka dan selatan Semenanjung Malaysia, yang berhadapan langsung dengan Selat Malaka serta Laut Cina Selatan. Pada umumnya daerah Bintan beriklim tropis basah dengan curah hujan tertinggi pada bulan September hingga Februari (rata-rata curah hujan ± 2,214 mm/tahun). Sedangkan musim kemarau terjadi antara bulan Maret sampai dengan Agustus. Arus di perairan Pulau Bintan termasuk arus yang cukup kompleks sebagai hasil interaksi berbagai macam arus musiman. Arus utama Bintan dipengaruhi oleh pola arus Laut Natuna secara umum, yang sangat tergantung dari angin musim (Bappeda Kabupaten Bintan, 2013).

Pulau Bintan dikenal memiliki ekosistem perairan yang beragam, didominasi oleh ekosistem lamun, hutan bakau atau *mangrove* (mencapai 6.941 ha) serta ekosistem terumbu karang dengan luas lebih dari 16.000 hektar. Dapat dijumpai tak kurang dari 49 genus karang batu dan sedikitnya 100 spesies coral (KP3K-KKP, 2013).

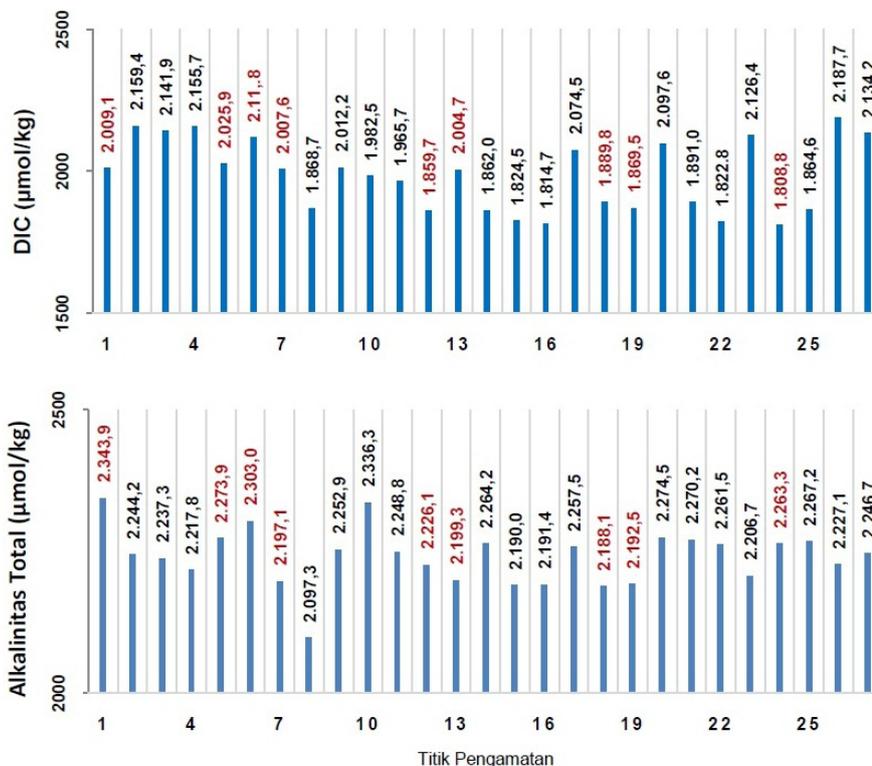
Kondisi fisika-kimia oseanografi di perairan pesisir timur Pulau Bintan selama penelitian menunjukkan dalam keadaan normal, hanya konsentrasi fosfat dibawah konsentrasi standar. Rentang nilai suhu dan salinitas secara berturut-turut adalah 29,2-30,9°C; 30,5-32 psu dengan rata-rata 29,7°C; 31,26 psu. Menurut Wibisono (2010), perairan di sekeliling Kepulauan Riau memang memiliki kadar salinitas antara 27,5-34 psu. Berbeda dengan nilai suhu dan salinitas, nilai nutrisi perairan yaitu silikat dan fosfat menunjukkan nilai yang beragam (*heterogen*). Rentang nilai silikat dan fosfat secara berturut-turut adalah 0,003-0,183; 0-0,006 mg/L dengan rata-rata 0,102; 0,003 mg/L. Konsentrasi nilai fosfat sangat rendah, bahkan di dua titik pengamatan nilai fosfat tidak dapat terdeteksi (0 mg/L). Mengacu pada baku mutu Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) No.51 Tahun 2004 tentang kelayakan untuk biota laut. Kadar fosfat standar untuk biota laut adalah 0,015 mg/L.

Nilai silikat masih termasuk kedalam kategori yang cukup jika mengacu pada Tsunogai (1979), kadar silikat yang optimal untuk biota laut adalah berkisar antara 0,140-0,280 mg/L, kecuali pada wilayah Berakit (sisi timur laut Pulau Bintan). Rendahnya kandungan silikat di perairan Berakit diduga karena banyaknya organisme-organisme primer yang memanfaatkan silikat sebagai bahan baku penyusun cangkang atau rangkanya, seperti diatom, foraminifera, serta radiolaria (Adriani, 2004). Hasil pegamatan yang

dilakukan pada tahun 2002, kelimpahan fitoplankton di sekitar perairan Selat Melaka bagian selatan (mencakup wilayah Berakit) mencapai 9.149,76 sel/liter, yang didominasi oleh genera diatom meliputi: *Chaetoceros*, *Ditylum*, *Nitzschia*, *Thalassionema*, dan *Thalassiothrix* dengan frekuensi kejadian diatas 90%. Jenis *Chaetoceros*. Sangat sering dijumpai dengan tingkat kelimpahan sebesar 2.159,9 sel/liter (Thoha, 2003). Nilai ini lebih besar jika dibandingkan dengan diatom di perairan Kepulauan Banggai yang lebih didominasi oleh *Chaetoceros*, *Rhizosolenia* dan *Thalassiothrix* dengan nilai kelimpahan hanya 461,34 sel/liter (Thoha & Rachman, 2013). Variasi kondisi biologis dan fisika-kimia oseanografi pesisir timur Pulau Bintan lebih banyak dipengaruhi oleh musim dan dinamika perairan di Selat Malaka, perairan Natuna serta Laut Cina Selatan. Tidak adanya masukan masa air sungai dalam jumlah besar dirasa belum mampu merubah kondisi perairan secara signifikan.

Sistem CO₂

Parameter pH, alkalinitas total, DIC, dan pCO₂ termasuk dalam sistem CO₂. Nilai pH di perairan pesisir timur Pulau Bintan berkisar antara 8,14-8,34, dengan rata-rata 8,2. Nilai pH mempunyai peranan yang penting dalam sistem CO₂ di air laut, karena dapat mempengaruhi kesetimbangan karbonat yang akan terbentuk, apakah dalam bentuk ion karbonat (CO₃²⁻) dan bikarbonat (HCO₃⁻), ataupun dalam bentuk



Gambar 1. Grafik nilai DIC dan alkalinitas total perairan Pesisir Timur Pulau Bintan pada 27 titik pengamatan (warna merah: menunjukkan nilai di wilayah terumbu karang).

senyawa CO₂ serta H₂CO₃ (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2001). Jika nilai pH rendah, maka akan cenderung membentuk senyawa H₂CO₃ dan ion HCO₃⁻, sedangkan jika nilai pH di perairan tinggi, maka ion CO₃²⁻ akan terbentuk lebih banyak. Berawal dari reaksi ini, pH dapat mempengaruhi nilai alkalinitas total, DIC, dan pCO₂.

Grafik pada Gambar 1 menunjukkan nilai DIC dan alkalinitas total hasil pengamatan. Nilai alkalinitas total berkisar antara 2.097,30-2.343,92 µmol/kg, dengan rata-rata 2.239,95 µmol/kg. Nilai alkalinitas secara keseluruhan menunjukkan pola yang tidak terlalu sama dengan nilai DIC, hanya di beberapa titik pengamatan yang menunjukkan kesamaan. Hasil pengukuran DIC di perairan berkisar antara 1.808,772-2.187,713 µmol/kg, dengan rata-rata 1.984,4 µmol/kg. Seharusnya pola yang terbentuk antara alkalinitas total dengan DIC adalah sama, seperti hasil penelitian Rustam *et al.* (2014). Ini diduga disebabkan karena adanya perbedaan nilai salinitas kaitannya dengan konsentrasi ion Na⁺, Cl⁻ dan ion-ion lainnya yang berkontribusi terhadap perubahan nilai pH, meningkatnya pH akan diikuti dengan meningkatnya total alkalinitas (Afdal *et al.*, 2012). Selain itu juga disebabkan adanya proses biogeokimia seperti pengendapan kalsium karbonat atau adanya produksi senyawa partikel organik oleh mikroalga (Friish *et al.*, 2003; Wolf-Gladrow *et al.*, 2007).

Hal yang menarik pada Gambar 1 adalah nilai DIC pada wilayah terumbu karang memiliki nilai yang cenderung lebih rendah dibandingkan pada perairan terbuka, terutama di wilayah Malang Rapat dan Berakit (titik pengamatan 12, 13, 18, 19, dan 24) nilainya ≤ 2.005 µmol/kg, sedangkan pada terumbu karang di wilayah Teluk Bakau (titik 1, 5, 6 dan 7) nilainya ≤ 2.118 µmol/kg. Rendahnya nilai DIC disekitar terumbu karang disebabkan karena meningkatnya proses metabolisme oleh organisme pada siang hari ketika terjadi proses fotosintesis fitoplankton, *zooxanthellae*, makroalga, serta proses kalsifikasi terumbu karang (Afdal & Luthan, 2012). Proses kalsifikasi terumbu karang tentunya memanfaatkan CO₃²⁻ sebagai bahan baku penyusun CaCO₃.

Tingginya konsentrasi DIC di kolom air laut juga akan diiringi dengan naiknya gradien daya tekan pCO₂ air laut, dikarenakan pCO₂ sebagai fungsi tekanan parsial gas CO₂ yang diturunkan dari parameter sistem CO₂ (pH, DIC dan alkalinitas total), fisika-kimia oseanografi (suhu dan salinitas), nutrisi (silikat dan fosfat), serta kecepatan angin 10 meter di atas permukaan laut. Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan nilai pCO₂ air laut lebih kecil dibandingkan dengan nilai pCO₂ atmosfer. Nilai pCO₂ air laut hanya berkisar antara 249,65-354,38 µatm (rata-rata 290,90 µatm), sedangkan pCO₂

atmosfer mencapai 332-409 µatm (rata-rata 373,07 µatm). Perubahan nilai pCO₂ atmosfer dan air laut ini mempengaruhi nilai *differential partial pressure of CO₂* (ΔpCO₂).

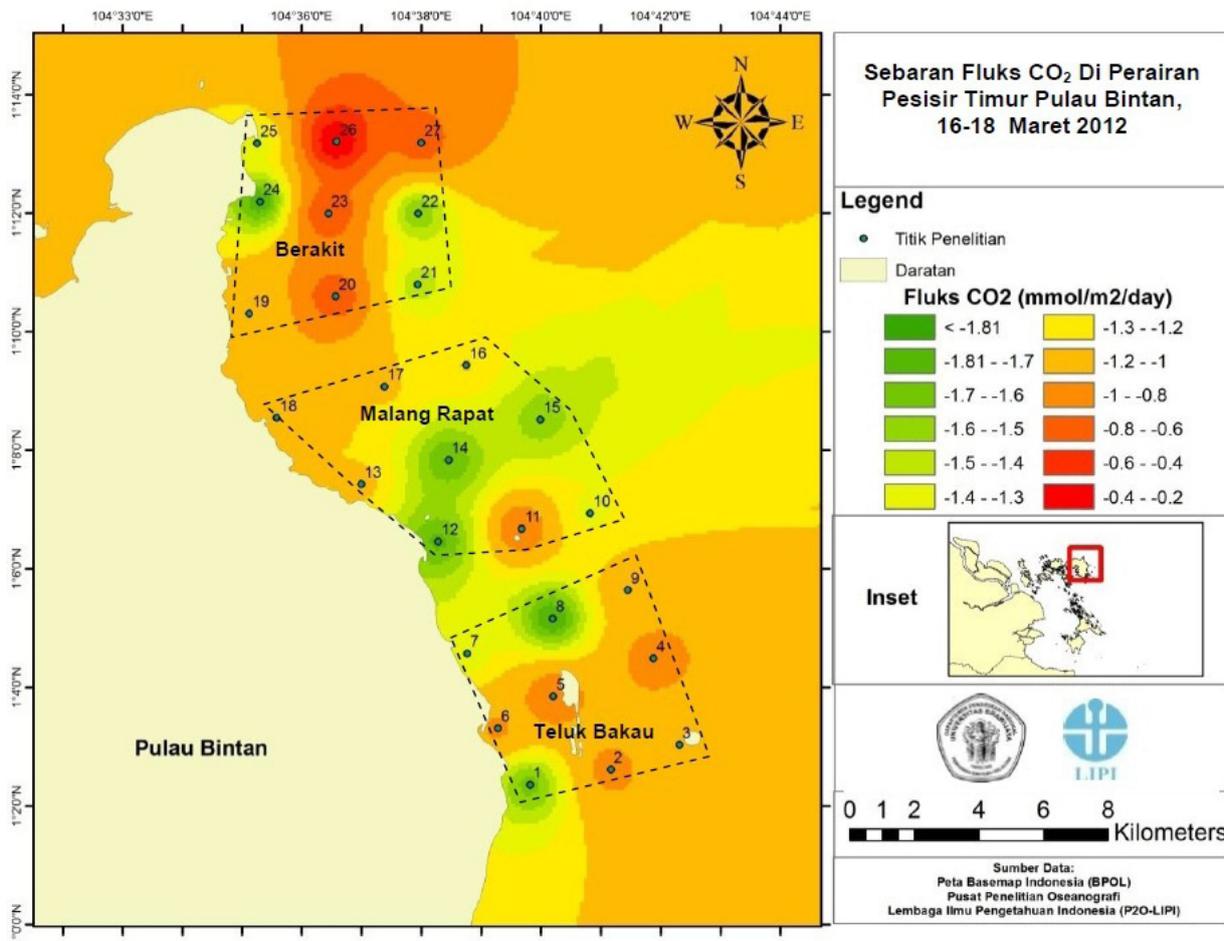
Analisis Sink – Source dan Sebaran Fluks CO₂

Hasil analisis menunjukkan bahwa perairan pesisir timur Pulau Bintan berperan sebagai *sink*, ini ditunjukkan dari nilai ΔpCO₂ yang seluruhnya negatif, artinya laut sebagai penerima CO₂ dari atmosfer. Nilai ΔpCO₂ berkisar antara -13,62 µatm sampai dengan -143,33 µatm. Nilai ΔpCO₂ ini ternyata berbanding lurus dengan nilai fluks CO₂. Gambar 2 merupakan sebaran nilai fluks CO₂ perairan pesisir timur Pulau Bintan.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai fluks CO₂ seluruhnya negatif seperti halnya nilai ΔpCO₂. Jumlah gas CO₂ yang ditransferkan dari atmosfer ke permukaan laut berkisar antara 0,22-1,82 mmolC/m²/hari. Laju penyerapan CO₂ tertinggi terdapat di titik 8 (Teluk Bakau) yaitu sebesar 1,82 mmolC/m²/hari, dan terendah pada titik 26 (Berakit) sebesar 0,22 mmolC/m²/hari. Sedangkan rata-rata perharinya, secara keseluruhan besar laju penyerapan CO₂ oleh air laut adalah 1,18 mmolC/m²/hari. Pada wilayah terumbu karang (titik 1, 5, 6, 7, 12, 13, 18, 19 dan 24) memiliki nilai fluks CO₂ yang cukup tinggi. Besaran CO₂ dari atmosfer yang masuk ke dalam wilayah perairan ekosistem terumbu karang antara 0,81 ≤ x ≤ 1,77 mmolC/m²/hari. Hasil ini cukup berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Fagan & Mackenzie (2007) di wilayah ekosistem terumbu karang Kaneoho Bay, Oahu, Hawaii (wilayah subtropis) yang menunjukkan fenomena *sink* dan *source*, namun lebih didominasi *source* dengan nilai fluks CO₂ sebesar 3,97 mmolC/m²/hari atau 1,45 molC/m²/tahun.

Diduga rendahnya konsentrasi DIC pada wilayah tersebut memicu terjadinya transfer CO₂ dari atmosfer menuju permukaan laut karena rendahnya nilai pCO₂ air laut. Menurut Afdal *et al.*, (2012), proses metabolisme terumbu karang dapat menyebabkan pergeseran dalam sistem karbon anorganik yang menyebabkan perubahan besar serta arah gradien pCO₂ antara air laut dan atmosfer. Dalam proses ini, keberadaan organisme asosiasi, komposisi material organik, produktivitas primer dan kecepatan angin 10 meter di atas permukaan laut juga mempunyai andil dalam penentuan sink dan source CO₂ tersebut.

Tabel 1 merupakan hasil beberapa observasi fluks CO₂ di perairan ekosistem terumbu karang di beberapa lokasi di dunia (seluruhnya di wilayah subtropis), ternyata menunjukkan nilai positif (*source*). Teremisinya CO₂ dari atmosfer menuju permukaan laut terjadi karena pengaruh dari proses kalsifikasi dan rendahnya produksi karbon organik bersih (*net organic*



Gambar 2. Sebaran nilai fluks CO₂ perairan pesisir timur Pulau Bintan, Maret 2012.

carbon) (Borges *et al.*, 2005). Gattuso *et al.*, (1998)

juga menyatakan bahwa beberapa hasil penelitian di ekosistem terumbu karang dengan tipe fringing reef fluks CO₂ yang terjadi adalah fenomena sink, dikarenakan lebih dipengaruhi oleh faktor anthropogenic dibandingkan dengan pengaruh dari sistem terumbu karang itu sendiri. Reaksi terhadap adanya perubahan metabolisme pada komunitas ekosistem terumbu karang, seperti meningkatnya produktivitas primer dan menurunnya laju kalsifikasi dapat merubah sistem fluks CO₂ dari *source* menjadi *sink*.

Parameter yang Dominan dalam Variabilitas Fluks CO₂ di Perairan Laut

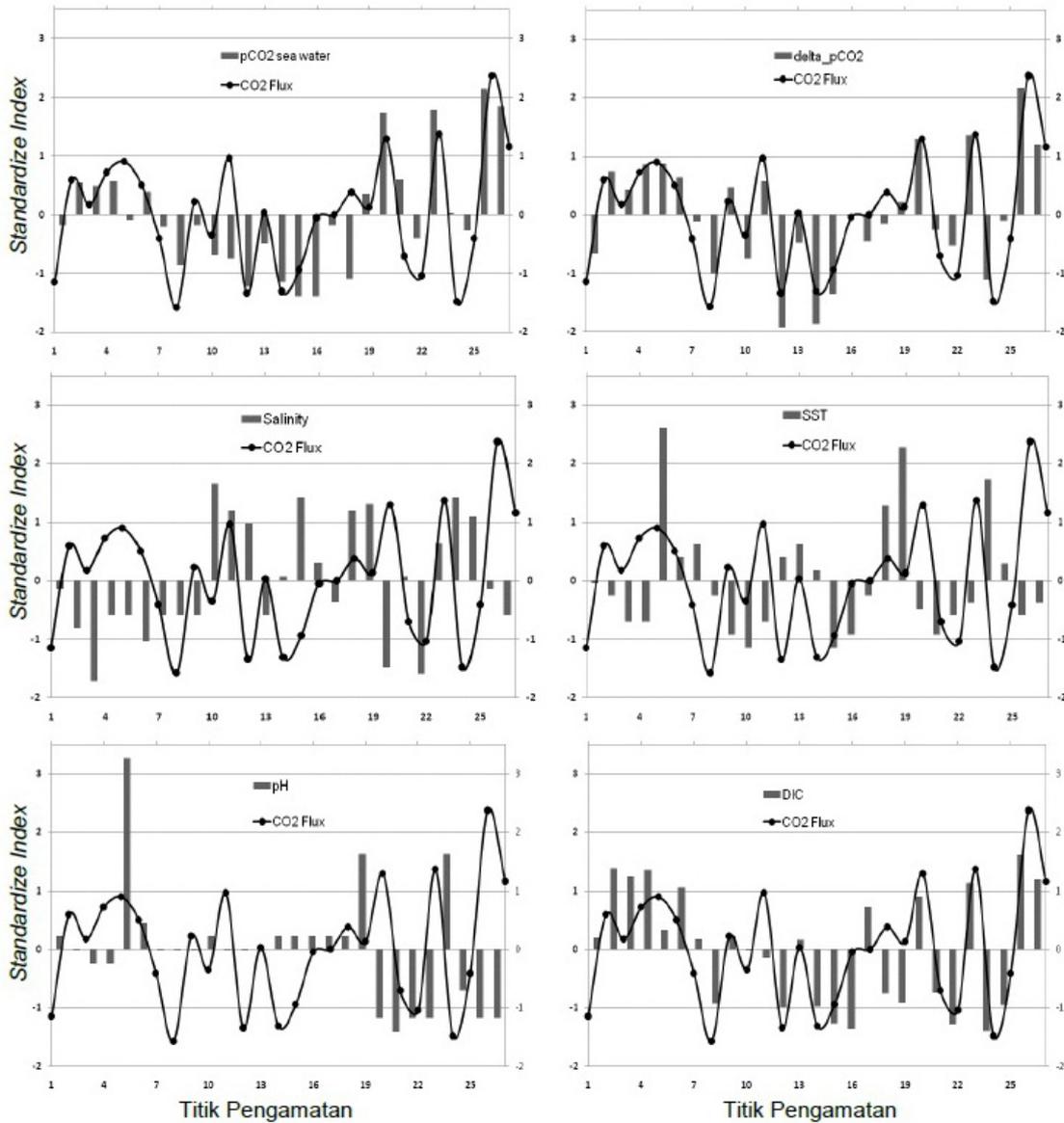
Nilai *Component Loadings from Correlation Matrix* hasil analisis PCA mengelompokkan tiap parameter penelitian menjadi beberapa *component* dengan *range* nilai antara -1 sampai dengan 1. Untuk keperluan penelitian ini, analisis PCA hanya digunakan sampai dengan empat *component*. Artian dari nilai pada tiap *component* menunjukkan tingkat kepentingan atau dominannya suatu parameter terhadap fluks CO₂. Jika

nilainya mendekati angka -1 atau 1, maka parameter tersebut memiliki tingkat dominasi dan pengaruh yang cukup signifikan dalam variabilitas fluks CO₂. Tabel 2 merupakan hasil analisis PCA untuk seluruh parameter penelitian.

Tabel 2 menunjukkan nilai salinitas, DIC, pCO₂ air laut dan ΔpCO₂ memiliki pengaruh yang sangat besar dalam variabilitas fluks CO₂ karena nilainya mendekati 1 dan terletak pada *component* 1. Ini menunjukkan nilai salinitas, DIC, pCO₂ air laut dan ΔpCO₂ memiliki hubungan yang kuat dalam penentuan nilai fluks CO₂. Kemudian parameter selanjutnya yang mempengaruhi adalah nilai silikat, fosfat, pCO₂ atmosfer dan kecepatan angin yang terletak pada *component* 2. Sedangkan untuk nilai pH dan suhu permukaan laut memiliki nilai yang mendekati 1 pula, yaitu 0,731 untuk pH dan 0,877 untuk suhu, namun hanya terletak pada *component* 3. Ini diduga nilai pH dan suhu memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap variasi fluks CO₂, namun pengaruhnya tidak secara langsung, memerlukan beberapa proses sampai pH dan suhu dapat merubah nilai fluks CO₂, seperti mempengaruhi gradien tekanan CO₂, kesetimbangan reaksi karbonat air laut, mempengaruhi proses metabolisme dari

Tabel 2. Nilai *Principal Component Loadings from Correlation Matrix* analisis PCA seluruh parameter penelitian

Parameters	Principal Component Loadings from Correlation Matrix			
	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4
CO ₂ Flux	0.861	-0.025	0.319	-0.340
SST	-0.265	-0.097	0.877	0.311
Salinity	-0.558	-0.230	0.206	-0.429
pH	-0.408	0.412	0.731	0.232
DIC	0.897	0.185	0.001	0.173
TA	0.143	-0.078	-0.078	0.472
PO ₄	-0.127	-0.741	0.308	0.008
SiO ₃	-0.208	0.865	-0.146	-0.098
pCO ₂ (atm)	-0.204	-0.591	-0.334	0.603
pCO ₂ (sea water)	0.862	-0.397	0.072	0.192
ΔpCO ₂	0.930	-0.010	0.271	-0.189
Wind speed	0.261	0.758	0.030	0.467



Gambar 3. Grafik pola *standardize index* salinitas, suhu permukaan laut, pH, DIC, pCO₂ water, ΔpCO₂ terhadap nilai fluks CO₂.

organisme yang terdapat di laut dan sebagainya. Begitu juga dengan nilai total alkalinitas yang terletak pada component 4. Secara jelas pola nilai parameter salinitas, suhu permukaan laut, pH, DIC, pCO₂ water, ΔpCO₂ terhadap nilai fluks CO₂ tersaji pada diagram *standardize index* Gambar 3.

Pola pada grafik *standardize index* dapat membantu menentukan dominasi tiap parameter terhadap nilai fluks CO₂ selain analisis PCA. Pada grafik tersebut terlihat bahwa antara DIC dan pCO₂ air laut memiliki pola yang sama, begitu juga dengan pola yang dibentuk oleh nilai ΔpCO₂ dan fluks CO₂. DIC sangat mempunyai andil besar dalam fluks CO₂, karena DIC dapat menunjukkan konsentrasi total CO₂ yang terkandung dalam air laut. Meningkatnya konsentrasi DIC tentunya akan diikuti dengan meningkatnya gradien atau gaya tekan partikel CO₂ air laut (pCO₂). Sedangkan untuk salinitas, diduga memiliki korelasi yang negatif dengan fluks CO₂, terlihat dari nilai analisis PCA salinitas menunjukkan nilai yang negatif yaitu -0,558 pada *component 1*.

Nilai salinitas memiliki hubungan berbanding terbalik dengan nilai fluks CO₂. Ini sesuai dengan pernyataan Afdal *et al.*, (2012), bahwa meningkatnya salinitas dapat menurunkan pCO₂ air laut. Zeebe & Wolf-Gladrow (2001) juga menyatakan terdapat tiga parameter utama yang dapat mempengaruhi proses spesiasi CO₂ dan kesetimbangan karbonat dalam air laut yaitu suhu, salinitas dan tekanan. Ketiga parameter ini dapat mempengaruhi nilai kesetimbangan disosiasi (*dissociation constant*) pada reaksi kesetimbangan karbonat dalam air laut, solubilitas CO₂, serta koefisien daya larut CO₂. Variasi ini mempengaruhi proses fluks CO₂ mencakup perubahan dinamika yang terjadi pada kolom air laut dengan atmosfer, kecepatan angin juga memiliki peran besar dalam kaitannya dengan transfer gas CO₂ dari atmosfer, sehingga pola regional dan musiman tentunya patut dipertimbangkan dalam proses observasi fluks CO₂.

KESIMPULAN

Perairan pesisir timur Pulau Bintan berperan sebagai *sink* atau penyerap CO₂ dari atmosfer dengan rata-rata nilai transfer gas CO₂ dari atmosfer ke permukaan laut sebesar -0.43 mmolC/m²/hari. Laju penyerapan CO₂ yang cukup tinggi terjadi pada perairan di sekitar ekosistem terumbu karang disebabkan karena konsentrasi DIC pada perairan tersebut yang cenderung rendah akibat metabolisme hewan-hewan karang

beserta asosiasinya. Salinitas, DIC, dan pCO₂ air laut merupakan faktor utama yang mengontrol nilai fluks CO₂. Variabilitas fluks CO₂ dan kondisi perairan

pesisir timur Pulau Bintan diduga lebih dipengaruhi oleh musim dan dinamika perairan Natuna serta Laut Cina Selatan dibandingkan pengaruh dari daratan, sehingga analisis nilai fluks CO₂ secara musiman dan time series sangat dibutuhkan.

PERSANTUNAN

Ucapan terimakasih kepada Pusat Penelitian Oseanografi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2O-LIPI), Jakarta atas pendanaan penelitian, pembimbingan, serta ketersediaan penggunaan fasilitas penelitian berupa laboratorium selama penelitian, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, N.S. & Rustam, A. (2010). Studi awal pengukuran sistem CO₂ di Teluk Banten. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan VI ISOI 2009, ISB: 978-979-98802-5-3, 17 halaman.
- Afdal, (2007). Siklus karbon dan karbon dioksida di atmosfer dan samudra. Oseana. 32: 29-41.
- Afdal, Panggabean, L.M.G. & Noerjito, D. N. (2011). Fluks karbon dioksida, hubungannya dengan produktivitas primer fitoplankton di perairan estuari donan, Cilacap. Oseanologi dan Limnologi di Indonesia. 37 (2): 323-337.
- Afdal, Kaswadji, R. F. & Koropitan, A. F. (2012). Pertukaran gas CO₂ atmosfer – laut di perairan Selat Nasik, Belitung. Jurnal Segar. 8 (1): 9-17.
- Afdal, & Luthan, R. (2012). Sistem CO₂ di perairan ekosistem pesisir, studi kasus di perairan Selat Nasik, Belitung Dan Pulau Pari, Kepulauan Seribu. P2OLIPI. Jakarta.
- Adriani. (2004). Analisis hubungan parameter fisika-kimia klorofil-a dengan produktivitas primer fitoplankton di perairan pantai Kabupaten Luwu. Thesis. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Bappeda Kabupaten Bintan. (2013). Kabupaten Bintan. <http://bappeda.kepriprov.go.id>. Diakses pada tanggal 28 Juli 2013.
- Bates, N. R., Samuel, L. & Merlivat, L. (2001). Biogeochemical and physical factors influencing seawater fCO₂ and air-sea CO₂ exchange on the Bermuda coral reef. Limnology and Oceanography. 46:833-846.
- Buddemeier, R. W., Kleypas, J. A. & Aronson, R. B. (2004). Coral reef and global climate change:

- potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems. Kansas Geological Survey. Kansas.
- Blei, D. (2008). Interacting with the data. www.cs.Princeton.edu. Diakses pada tanggal 30 Juni 2013.
- Borges, A. V., Delille, B. & Frankignoulle, M. (2005). Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: diversity of ecosystem counts. *Geophysical Research Letters*.
- Chen, C. T. A. & Borges, A.V. (2009). Recording views on carbon cycling in the coastal ocean: continental shelves as sinks and near – shore ecosystem as sources of atmospheric CO₂. *Deep – Sea research II*. 56: 578-590.
- Fagan, K. E., & Mackenzie, F.T. (2007). Air-sea exchange in a subtropical estuarine-coral reef system, Kaneohe Bay, Oahu, Hawaii. *Marine Chemistry*. 106: 174-191.
- Frankignoulle, M., Copin-Mentegut, Pichon, G., Gattuso, M., Biondo, J. P. & Bourge, R. (1996). Carbon fluxes in coral reefs. II. Eulerian study of inorganic carbon dynamics and measurement of air-sea CO₂ exchanges. *Marine ecology. Progress Series*. 145 (1-3): 123-132.
- Friish, K., Zinger, A. K. & Wallace, D. W. R.. (2003). The salinity normalization of marine inorganic carbon chemistry data. *Geophysics Research Letter*. 30 (2): 1085.
- Gattuso, J. P., M. Frankignoulle, M. & Wollast, R. (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystem. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29: 405-434.
- Giggenbach, W. F. & Goguel, R.L. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Chemistry Division. Department of Scientific and Industrial Research. Petone. New Zeland:81 pp.
- Grasshof, K. (1976). *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie, Weinheim. New York.
- IPCC, (2001). *The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. The Scientific Basis In Climate Change 2001*. 185-237.
- JGOFS. (2000). *Joint Global Ocean Flux Study: Biogeokimia Laut dan Perubahan Global*. Terjemahan Agus Setiawan. Pusat Teknologi Lingkungan-BPPT. Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia (KLH). (2004). *Baku mutu air laut untuk biota laut*. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.51 Tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Laut. KLH. Jakarta.
- KP3K-KKP. (2013). *Profil Pulau Bintan*. <http://ppk-kp3k.kkp.go.id>. Diakses pada tanggal 29 Juli 2013.
- Lewis, E. & Wallace, D. (1997). *CO₂ SYS*. Program developed for CO₂ system calculations. Department of Applied Science, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.
- McCharty, J.J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. & White, K.S. (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability, contribution of working group ii to the third assesment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC)*. Cambridge University Press.
- Ohde, S. & Van Woesik, R. (1999). Carbon dioxide flux and metabolic processes of a coral reef, Okinawa. *Bulletin of Marine Science*. 65: 559-576.
- Orr, J. C. R. Najjar, C.L., Sabine & Joos, F. (1999). *Internal OCMIP report*. Lab. Des. Sci Du Clim et de l'Environ/Comm. A l'Energie Atom. France.
- Raiko, T., Llin A., & Karhunen, J. (2002). *Principal Component Analysis for Large Scale Problems with Lots of Missing Values*. Adaptive Informatics Research Center. Helsinki University of Technology. Helsinki.
- Reid, C., Marshall, J., Logan, D. & Kleine, D. (2011). *Coral reef and climate change: the guide for education and awareness*. The University of Queensland.
- Rustam A., Bengen, D. G., Arifin, Z. & Gaol, J. L. (2014). *Dinamika Dissolved Inorganic Carbon (DIC) di ekosistem lamun Pulau Pari*. *Jurnal Segara*. 10 (1): 30-41.
- Sartimbul, A., Nakata, H. & Hayashi, I. (2007). *Recent change in water temperature and its effect on fisheries catch of bottom gillnets in a costal region of the Tsushima Warm Current*. *La mer*. 45: 1-13.
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. (1968). *A practical handbook of seawater analysis*. fisheries research board of Canada. Ottawa.
- Sulzman, Elizabeth W. (2000). *The carbon cycle*. National center for atmospheric research. USA.

- Takahashi, T, Shuterland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, D., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D.C.E., Schuster, U., Metzi, N., Inoue, H.Y., Ishii, M., Midorikawa, T., Y.Nojiri, Kortzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, B., Bates, N.R. & de Baar, H.J. W. (2008). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global ocean. *Deep Sea Research*. 56: 554-577.
- Thoha, Hikmah. (2003). Pengaruh musim terhadap plankton di perairan Riau Kepulauan dan sekitarnya. *Makara, Sains*. 7 (2): 59-70.
- Thoha, H. & A. Rachman, A. (2013). Kelimpahan dan distribusi spasial komunitas plankton di perairan Kepulauan Banggai. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 5 (1): 145-161.
- Tsunogai, S. (1979). Dissolved silica as the primary factor determining the composition of phytoplankton classes in the ocean. *Bull. Facul. Fisheries. Hokkaido Univ*. 30: 314-322.
- Wang, S. L., C. T. A. Chen. G. H. Hong & C. S. Chung. (2000). Carbon dioxide and related parameters in the East China Sea. *Continental Shelf Research*. 20: 525-544.
- Wanninkhof, R. (1992). Relationship between wind speed and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (The Duplin River): A marsh CO₂ pump. *Limnology and oceanography*. 49: 341-354.
- Weiss, R. F. (1974). Carbon dioxide in water and seawater, the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry* 2: 203-215.
- Wibisono, M. S. (2010). Pengantar ilmu kelautan edisi 2. UI – Press. Jakarta.
- Wolf-Gladrow, D. A., Richard, E., R.E. Zeebe, C. Klaas, A. Kortzinger & A.G. Dickson. (2007). Total alkalinity: the explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes. *Marine Chemistry*. 106: 287-300.
- Zeebe, R. E. & Wolf-Gladrow, D. (2001). CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Amsterdam.