



OSEANOLOGI DAN LIMNOLOGI DI INDONESIA

Print ISSN: 0125-9830 Online ISSN: 2477-328X

Nomor Akreditasi: 712/AU3/P2MI – LIPI/10/2015

<http://jurnal-oldi.or.id>



Fluks CO₂ di Perairan Pesisir Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat

CO₂ Flux in the Coastal Waters of Lombok, West Nusa Tenggara

Afdal

Pusat Penelitian Oseanografi LIPI

Email: afdaldjalius28@gmail.com

Submitted 29 January 2016. Reviewed 15 August 2016. Accepted 22 August 2016.

Abstrak

Wilayah pesisir dan laut memainkan peranan penting dalam pengaturan iklim dengan menyerap CO₂ dan bertukar karbon dengan berbagai kompartemen penyimpan karbon seperti atmosfer, daratan, dan biota. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pertukaran CO₂ antara permukaan air laut dan atmosfer di perairan pesisir Pulau Lombok beserta komponen penyerap dan pelepasnya, serta parameter yang berpengaruh terhadap proses tersebut. Penelitian dilakukan pada bulan April 2012 di perairan Teluk Sekotong (10 stasiun) dan Teluk Kodek (6 stasiun). Tekanan parsial ($p\text{CO}_2$) dan fluks CO₂ di permukaan laut dihitung dengan menggunakan model ABIOTIC dari *ocean carbon cycle model intercomparison project phase-2 (OCMIP-2)*. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara umum, perairan Teluk Kodek dan Teluk Sekotong bagian luar adalah penyerap CO₂, sedangkan perairan Teluk Sekotong bagian dalam berperan sebagai pelepas CO₂. Fluks CO₂ di perairan Teluk Sekotong berkisar dari -0,61 hingga 0,52 mmol.m⁻².hari⁻¹, sedangkan di Teluk Kodek berkisar dari -0,80 hingga -1,84 mmol.m⁻².hari⁻¹ dengan rata-rata $0,05 \pm 0,40$ dan $-1,29 \pm 0,40$ mmol.m⁻².hari⁻¹. Teluk Kodek berperan sebagai penyerap CO₂ dari atmosfer karena dipengaruhi oleh massa air Selat Lombok yang mempunyai konsentrasi nutrisi dan klorofil yang tinggi. Keberadaan ekosistem lamun dan terumbu karang yang mendukung pulau-pulau kecil yang ada di Teluk Kodek turut mengurangi peningkatan $p\text{CO}_2$ kolom air dan memperkuat penyerapan CO₂ di perairan tersebut. Teluk Sekotong Bagian Dalam berperan sebagai pelepas CO₂ karena perairan ini cenderung lebih tertutup, sehingga waktu tinggal massa air menjadi lebih lama yang mengakibatkan peningkatan pengayaan DIC dan $p\text{CO}_2$.

Kata kunci: $p\text{CO}_2$, fluks CO₂, klorofil-a, Lombok, penyerap CO₂, pelepas CO₂

Abstract

Coastal and marine areas play an important role in the climate regulation by absorbing CO₂ and exchanging carbon with various carbon storing compartments like atmosphere, land, and biota. This study aimed to determine the exchange of CO₂ between the sea surface and the atmosphere in the coastal waters of Lombok island as well as its source and sink components, and the parameters that influence the process. The study was conducted in April 2012 in the waters of Sekotong Bay (10 stations) and Kodek Bay (6 stations). The partial pressure of CO₂ ($p\text{CO}_2$) and CO₂ flux at sea level was calculated using abiotic models of the ocean carbon cycle models intercomparison project phase-2 (OCMIP-2). The results showed that in general,

waters in Kodek Bay and outer part of Sekotong Bay acted as a CO₂ sink from the atmosphere, whereas the waters in the inner part of Sekotong Bay acted as a CO₂ source to the atmosphere. CO₂ flux in the waters of Sekotong Bay ranged from -0.61 to 0.52 mmol.m⁻².hari⁻¹, whereas in Kodek Bay ranged from -0.80 to -1.84 mmol.m⁻².hari⁻¹ with an average of 0.05 ± 0.40 and -1.29 ± 0.40 mmol.m⁻².hari⁻¹. Kodek Bay played a role as a CO₂ sink from the atmosphere as it was influenced by the water mass of Lombok Strait rich in nutrients and chlorophyll. The existence of seagrass and coral reef ecosystems that supported the small islands within Kodek Bay helped reduce the elevated pCO₂ water column and strengthen the absorption of CO₂ in these waters. Inner Sekotong Bay acted as a CO₂ source since these waters tended to be enclosed. This made the retention time of the water mass become longer, resulting in an enrichment of DIC and pCO₂.

Keywords: pCO₂, CO₂ flux, chlrophyll, Lombok, CO₂ sink, CO₂ source

Pendahuluan

Wilayah pesisir dan laut memainkan peranan penting dalam pengaturan iklim dengan menyerap CO₂ dan sebagai tempat pertukaran karbon dengan berbagai kompartemen penyimpanan karbon seperti atmosfer, daratan, dan biota. Beberapa perubahan dalam faktor fisika perairan pesisir akibat pemanasan global dapat mengubah siklus karbon dan fluks CO₂ udara-laut, seperti peningkatan stratifikasi massa air, peningkatan luas zona *upwelling* pesisir, peningkatan luas zona oksigen minimum, dan perubahan volume air tawar yang masuk ke laut (Borges, 2011). Selain itu, perubahan penggunaan lahan, *run off* air tawar dari daratan, dan perubahan kesetimbangan karbonat air laut turut memengaruhi siklus karbon dan pertukaran antara CO₂ atmosfer dan laut (Borges, 2011).

Peta fluks CO₂ global atmosfer-laut yang dihasilkan oleh Takahashi et al. (2002) menunjukkan bahwa tidak semua lautan dan pesisir berfungsi sebagai penyerap CO₂ antropogenik. Lautan tropis pada umumnya berfungsi sebagai pelepas CO₂, sedangkan perairan subtropis dan lintang tinggi berfungsi sebagai penyerap CO₂ (Chen & Borges, 2009). Posisi laut Indonesia yang berada di daerah tropis memiliki indikasi kuat sebagai pelepas CO₂ karena temperatur permukaan laut tinggi, sehingga tekanan parsial CO₂ di permukaan laut lebih tinggi daripada di atmosfer. Hal ini menjadikan perairan tropis sebagai pelepas CO₂. Sebaliknya, di lintang menengah dan tinggi temperatur permukaan laut rendah, sehingga tekanan parsial CO₂ di permukaan laut lebih rendah daripada di atmosfer.

Namun, beberapa penelitian yang telah dilakukan di perairan pesisir Indonesia menunjukkan bahwa tidak semua perairan laut dan pesisir Indonesia berperan sebagai pelepas CO₂. Perbatasan Laut Jawa dan Laut Bali

(Muchtar et al., 2013), perairan Teluk Banten pada musim barat (Rustam et al., 2013), serta perairan Ternate dan sekitarnya (Afdal & Giyanto, 2013) berperan sebagai penyerap CO₂, sedangkan Laut Timor, Laut Sawu, Laut Bali (Muchtar et al., 2013), perairan Selat Nasik, Belitung (Afdal et al., 2012), perairan Cilacap (Afdal et al., 2011), Laut Jawa (Muchtar et al., 2013), dan perairan Teluk Banten pada musim timur (Rustam et al., 2013) berperan sebagai pelepas CO₂. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi pertukaran CO₂ antara atmosfer dan laut. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa arah dan besar pertukaran CO₂ udara-laut di perairan pesisir juga sangat tergantung pada jenis ekosistem di perairan pesisir (Borges et al., 2005), selain arus laut yang dominan di perairan pesisir (Liu et al., 2000) dan posisi lintang secara geografis (Borges et al., 2005; Liu et al., 2000).

Perairan pesisir Lombok Barat berhubungan langsung dengan Selat Lombok. Dilihat dari segi oseanografi, Selat Lombok merupakan selat yang mempunyai peranan penting di kawasan konvergensi Indo-Pasifik, di antaranya adalah fenomena Arlindo (Murray & Arief, 1988), yaitu fenomena aliran massa air dari Pasifik Barat ke Lautan Hindia yang bisa berpengaruh terhadap pertukaran CO₂ udara-laut di perairan tersebut. Selain itu, Teluk Sekotong dan Teluk Kodek didukung oleh ekosistem pesisir tropis seperti terumbu karang, lamun, dan bakau yang turut memengaruhi fluks CO₂ di perairan pesisir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pertukaran CO₂ antara permukaan air laut dan atmosfer di perairan pesisir Pulau Lombok beserta komponen penyerap dan pelepasnya, serta parameter yang berpengaruh terhadap proses tersebut.

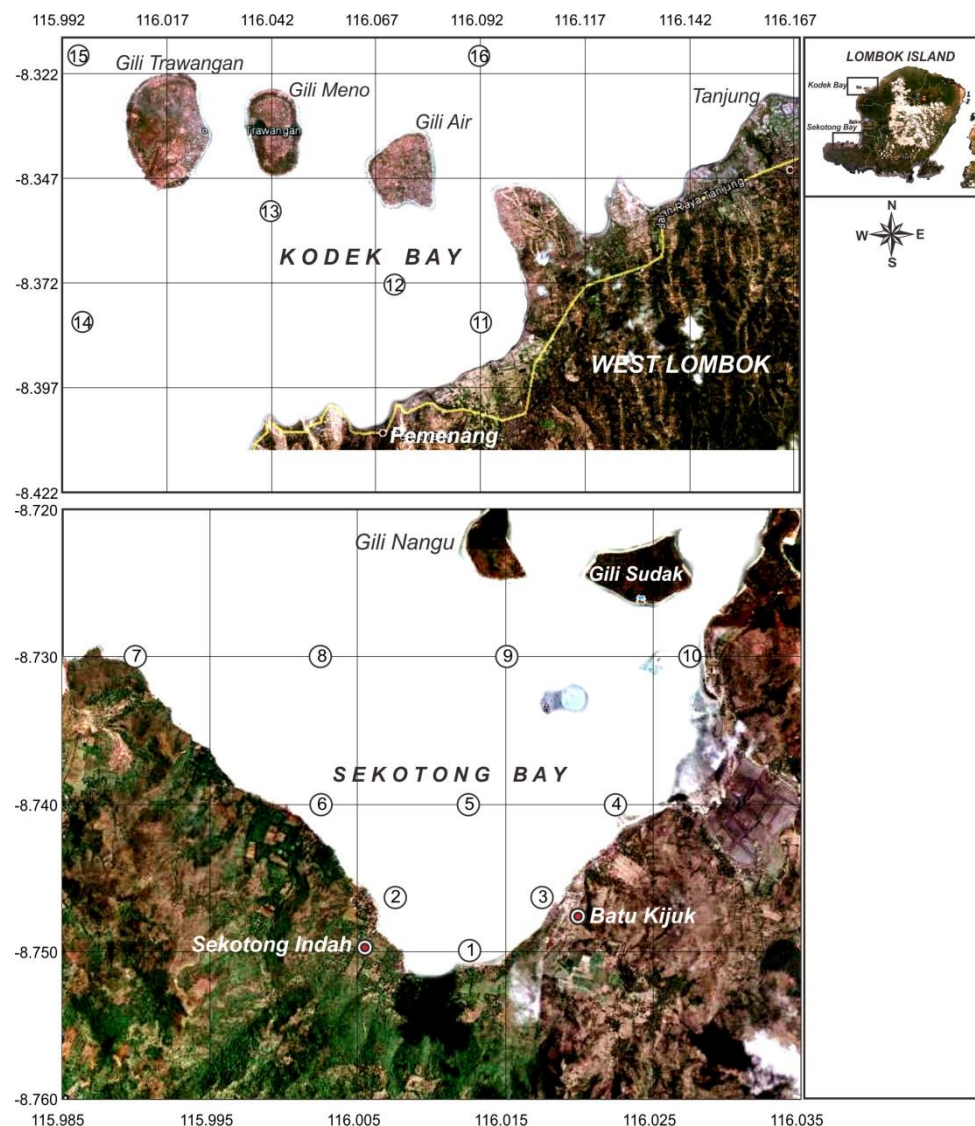
Metodologi

Penelitian dilakukan pada bulan April 2012 di perairan pesisir Barat Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat, yaitu di perairan Teluk Sekotong dan Teluk Kodek. Pengambilan sampel air dilakukan di lapisan permukaan 10 stasiun yang tersebar di perairan Teluk Sekotong dan 6 stasiun di perairan Teluk Kodek (Gambar 1). Pengukuran parameter fisika kimia suhu, salinitas, intensitas cahaya, DO, pH, dan CO_2 atmosfer langsung dilakukan di lapangan, sedangkan parameter CO_2 kolom air, klorofil-a fitoplankton, dan konsentrasi nutrisi diukur dengan menganalisis sampel air laut di Laboratorium Biogeokimia Pusat Penelitian Oseanografi LIPI. Pengambilan data suhu dan konsentrasi oksigen terlarut dilakukan

dengan menggunakan DOmeter, salinitas dengan refraktometer, intensitas cahaya dengan lightmeter, pH dengan pHmeter, dan CO_2 atmosfer dengan CO_2 meter. Khusus untuk parameter sistem CO_2 , sesaat setelah pengambilan sampel, ditambahkan HgCl_2 pada sampel air untuk menghentikan aktivitas biologis dan sampel disimpan dalam *coolbox* suhu rendah untuk mencegah CO_2 terlepas ke udara. Analisis lebih lanjut dilakukan di laboratorium.

Pengukuran Sistem Karbonat Laut

Sistem karbonat laut di perairan dikaji melalui empat parameter, yaitu *Dissolved Inorganic Carbon* (DIC), alkalinitas total, pH, dan tekanan parsial CO_2 ($p\text{CO}_2$) (Lewis & Wallace, 1997; Dickson et al., 2007).



Gambar 1. Lokasi stasiun pengambilan sampel di perairan Teluk Sekotong dan Teluk Kodek.
Figure 1. Location of sampling stations in Sekotong and Kodek Bays.

Dalam penelitian ini DIC diukur menggunakan metode titrimetri (Giggenbach & Goguel, 1989) dengan prinsip yang didasarkan pada perubahan pH setelah penambahan HCl dan NaOH. DIC didapatkan dari penjumlahan HCO_3^- dan CO_3^{2-} dalam satuan $\mu\text{mol/kg}$.

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{60092 (A \times \text{NHCl} - D \times \text{NNaOH})}{V_s}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{61061 (B \times \text{NHCl} - C \times \text{NNaOH})}{V_s} - 1,015 \times [\text{CO}_3^{2-}]$$

Keterangan:

A dan B = Volume HCl yang digunakan untuk menurunkan pH.

C dan D = Volume NaOH yang digunakan untuk menaikkan pH.

V_s = Volume sampel air laut yang dianalisis

Hasil pengukuran DIC dengan metode ini kemudian dikoreksi dengan hasil pengukuran *Certified Reference Material* (CRM) dari Marine Physical Laboratory, University of California, San Diego.

Alkalinitas Total diukur menggunakan metode titrimetri (Grasshoff, 1976) dengan prosedur berikut, yaitu ke dalam 50 mL sampel air laut ditambahkan 5 mL HCl 0,025 M dan dididihkan selama ± 5 menit, kemudian didinginkan dalam penangas air. Setelah dingin, ke dalam sampel ditambahkan 3–5 tetes *bromothymol blue* sebagai indikator. Sampel kemudian dititrasi dengan NaOH 0,02 M. Selama titrasi, gas bebas CO_2 (nitrogen atau helium) dialirkan ke dalam sampel. Proses titrasi dihentikan setelah sampel berwarna biru. Volume NaOH yang terpakai dicatat dan dimasukkan ke dalam rumus berikut:

$$\text{Alkalinitas Total} = \frac{1000 \times V_{\text{HCl}} \times t_{\text{HCl}}}{V_b} - \frac{1000 \times V_{\text{NaOH}} \times t_{\text{NaOH}}}{V_b}$$

Keterangan:

V = Volume HCl dan NaOH

t = Molaritas HCl dan NaOH

V_b = Volume sampel

Tekanan parsial CO_2 ($p\text{CO}_2$) kolom air dihitung dengan menggunakan model OCMIP (*Ocean Carbon Cycle Model Intercomparison Project*) yang dikembangkan oleh Orr et al. (1999). Tekanan parsial CO_2 atmosfer diukur menggunakan CO_2 meter secara simultan dengan pengambilan sampel untuk pengukuran $p\text{CO}_2$ kolom air. Berdasarkan nilai $p\text{CO}_2$ laut dan

atmosfer dapat ditentukan apakah suatu perairan bertindak sebagai penyerap (*sink*) atau pelepas (*source*) CO_2 .

Fluks CO_2 atau pertukaran aliran gas CO_2 antara udara dan laut dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Fluks } \text{CO}_2 = K \cdot \alpha \cdot \Delta p\text{CO}_2 \text{ air-atm}$$

$$\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2 \text{ air} - p\text{CO}_2 \text{ atm}$$

Keterangan:

K = kecepatan transfer gas (fungsi dari kecepatan angin yang diambil dari data BMKG)

α = koefisien daya larut (fungsi dari suhu dan salinitas)

$\Delta p\text{CO}_2 \text{ air-atm}$ = selisih antara tekanan parsial CO_2 permukaan air dan atmosfer

Pengukuran Nutrien dan Klorofil-a

Pengukuran konsentrasi nutrien (fosfat, nitrat, dan silikat) dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer HACH (APHA, 2005; Rustam et al., 2014). Pengukuran konsentrasi klorofil-a fitoplankton dilakukan secara fluorometrik mengikuti Cochlan & Hendorn (2012). Sebanyak 0,1–1,0 L air disaring dengan menggunakan filter Whatman CNM berpori 0,45 μm dan berdiameter 25 mm. Untuk mempercepat penyaringan digunakan pompa vakum dengan kekuatan hisap < 30 cmHg. Setelah penyaringan, filter diekstraksi dengan menggunakan larutan aseton 90%. Selanjutnya, disentrifugasi pada putaran 4.000 rpm selama kurang lebih 30 menit untuk memisahkan filtrat dari cairan yang mengandung klorofil. Kemudian, cairan tersebut dibaca fluoresensinya dengan menggunakan fluorometer Turner Trilogy tipe AU-10. Konsentrasi klorofil-a fitoplankton diperoleh dengan menggunakan rumus:

$$\text{Klorofil-a } (\mu\text{g/L}) = ((y-b)/m)(v/V)$$

Keterangan:

Y = nilai fluoresensi

B = nilai sumbu y yang berpotongan pada kurva kalibrasi

M = kemiringan (*slope*) garis regresi pada kurva standar (kalibrasi)

V = volume ekstrak (penambahan aseton 90%) (mL)

V = volume sampel yang disaring (mL)

Penentuan parameter fisika-kimia oseanografi dan sistem CO_2 yang dominan terhadap perubahan nilai tekanan parsial dan fluks

CO₂ dilakukan dengan analisis PCA (*Principal Component Analysis*). Hasil analisis PCA ini menunjukkan parameter-parameter atau variabel penelitian yang berperan penting. Analisis PCA dilakukan dengan data yang sudah distandardisasi per variabel terhadap total masing-masing variabel dengan menggunakan *software* Primer (Clarke & Warwick, 2001). Untuk melihat beda nyata antara lokasi penelitian dilakukan *t-test* menggunakan *software* RStudio (R Core Team, 2015).

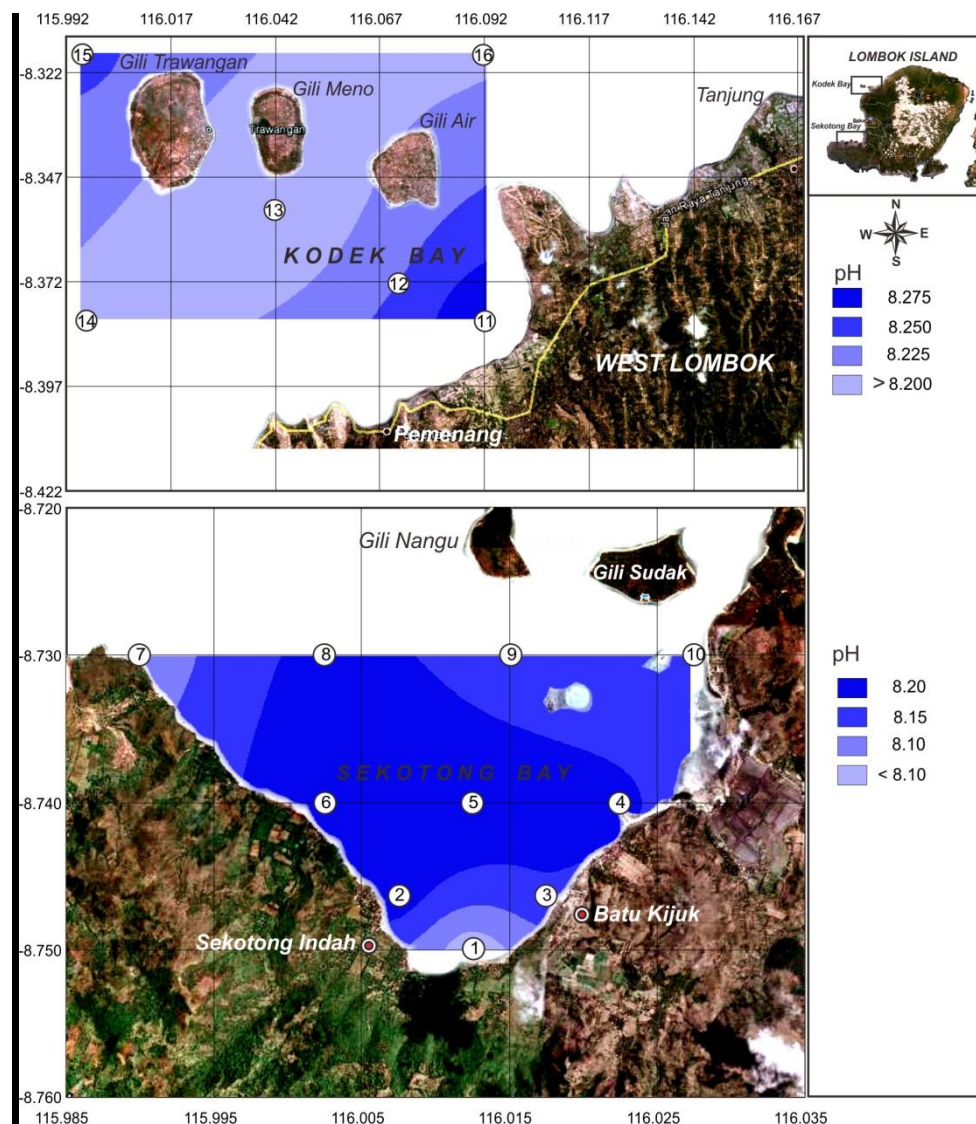
Hasil

Sistem Karbonat Laut

Sistem karbonat dalam air laut ditentukan oleh empat parameter, yaitu pH, konsentrasi DIC,

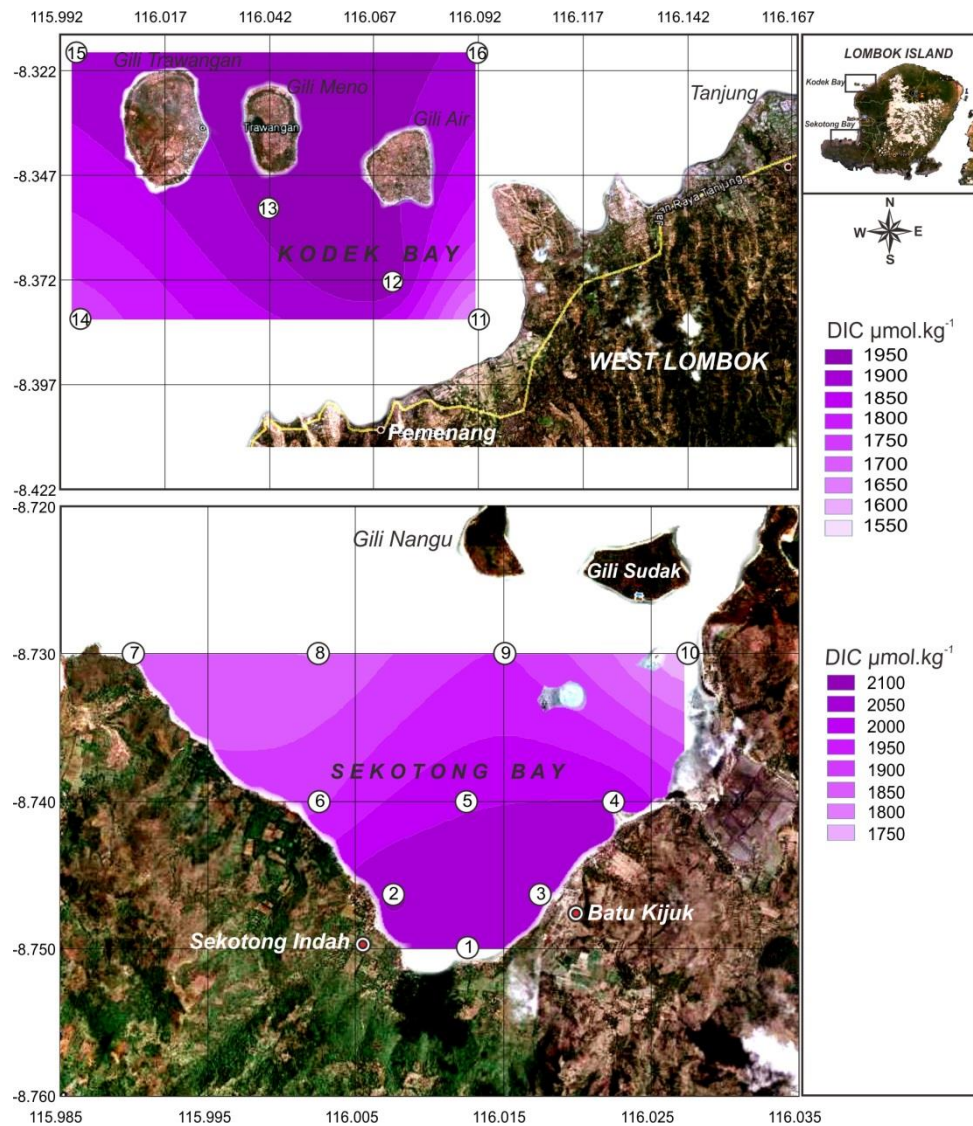
alkalinitas total, dan tekanan parsial CO₂ (Lewis & Wallace, 1997; Zeebe & Wolf-Gladrow, 2001; Dickson et al., 2007). Nilai pH merupakan parameter penting dalam sistem CO₂ karena sangat memengaruhi keseimbangan karbonat dalam air laut. Nilai pH yang rendah akan menggeser keseimbangan karbonat yang menyebabkan HCO₃⁻ dan CO₂ bebas lebih banyak terbentuk. Sebaliknya, kondisi pH yang tinggi akan menyebabkan ion karbonat lebih banyak terbentuk (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2001). Perubahan keseimbangan karbonat tersebut akan berpengaruh terhadap pCO₂ dalam air laut.

Gambar 2 menunjukkan sebaran pH di perairan Teluk Sekotong dan Teluk Kodek pada bulan April 2012. Secara umum, pH perairan Teluk Kodek lebih tinggi dan lebih homogen



Gambar 2. Pola distribusi pH di wilayah studi, April 2012

Figure 2. Distribution pattern of pH in study area, April 2012.



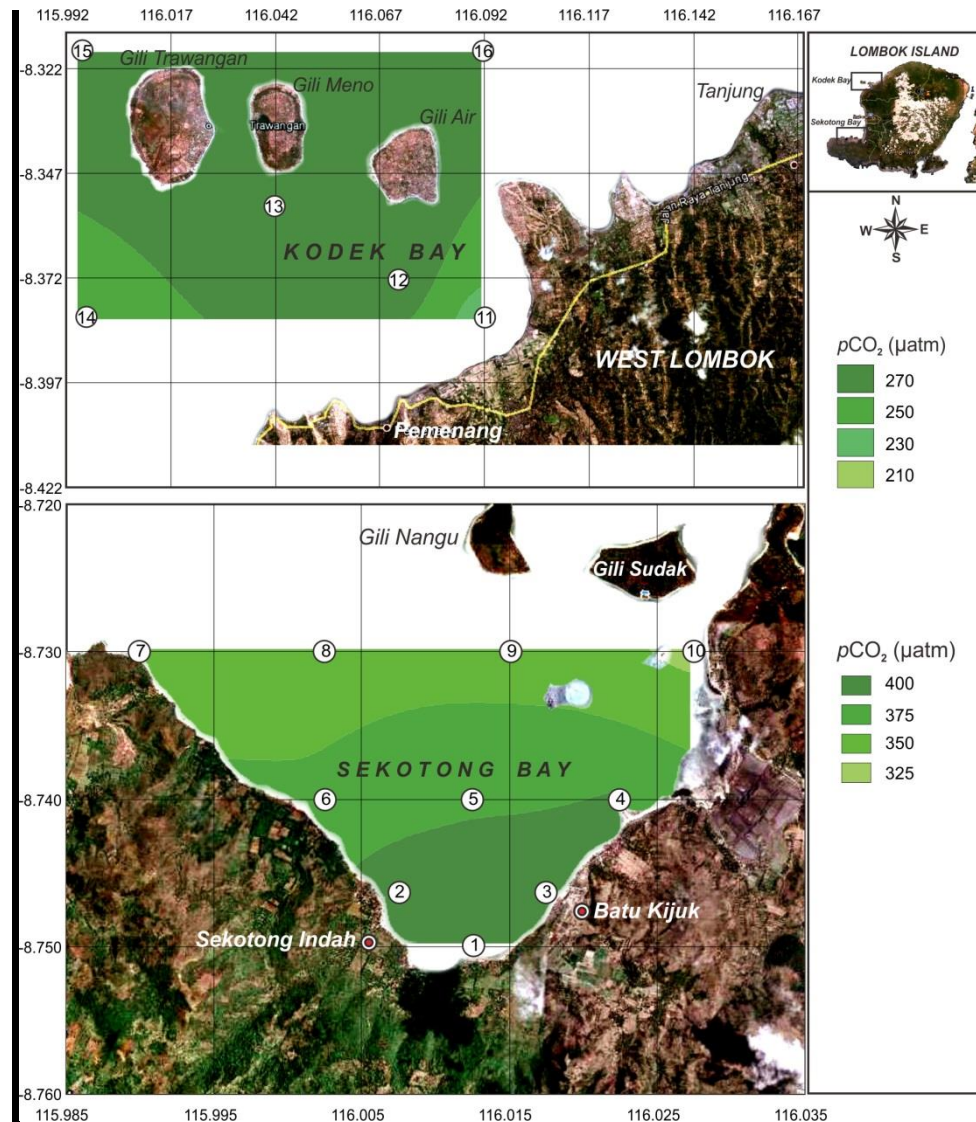
Gambar 3. Pola distribusi karbon anorganik terlarut (DIC) di wilayah studi, April 2012.

Figure 3. Distribution pattern of dissolved inorganic carbon (DIC) in study area, April 2012.

dibandingkan Teluk Sekotong, dengan pH rata-rata di kedua perairan tersebut masing-masing $8,23 \pm 0,04$ dan $8,18 \pm 0,06$. Perbedaan pH ini disebabkan oleh perairan Teluk Kodek yang lebih terbuka dan berhubungan langsung dengan Selat Lombok, sehingga massa air Teluk Kodek cenderung lebih dipengaruhi oleh massa air Selat Lombok yang mempunyai salinitas yang lebih tinggi. Salinitas dan pH merupakan faktor penting yang memengaruhi kelarutan CO_2 dalam air laut. Semakin tinggi salinitas, kelarutan CO_2 akan semakin tinggi dan CO_2 terlarut akan bereaksi dengan kalsium membentuk CaCO_3 .

Parameter sistem karbonat laut yang lain adalah konsentrasi DIC yang menggambarkan total konsentrasi CO_2 dalam air laut yang terdiri atas bikarbonat (HCO_3^-), karbonat (CO_3^{2-}), dan

CO_2 bebas terlarut (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2001). Secara umum, konsentrasi DIC di perairan Teluk Kodek lebih tinggi dibandingkan Teluk Sekotong. Konsentrasi DIC di perairan Teluk Kodek dan Teluk Sekotong masing-masing berkisar $1.567\text{--}1.948 \mu\text{mol/kg}$ dan $1.750\text{--}2.106 \mu\text{mol/kg}$ dengan rata-rata $1.971,38 \pm 118,55 \mu\text{mol/kg}$ dan $1.818,74 \pm 147 \mu\text{mol/kg}$. Berdasarkan pola sebaran DIC (Gambar 3) tampak bahwa di perairan Teluk Sekotong, konsentrasi DIC yang tinggi ditemukan di perairan teluk bagian dalam dan konsentrasinya semakin rendah menuju teluk bagian luar, sedangkan di perairan Teluk Kodek konsentrasi DIC yang tinggi ditemukan di sekitar Pulau Gili Terawangan, Gili Meno, dan Gili Air.



Gambar 4. Pola distribusi tekanan parsial CO₂ ($p\text{CO}_2$) kolom air di wilayah studi.

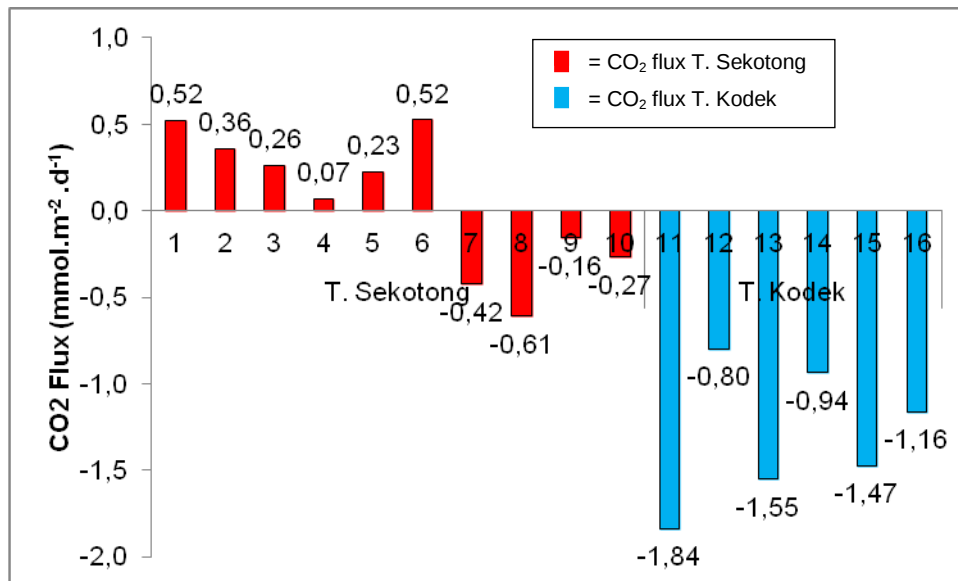
Figure 4. Distribution pattern of water column CO₂ partial pressure ($p\text{CO}_2$) in the study area

Konsentrasi DIC yang tinggi di kolom air laut diiringi dengan kenaikan gradien tekanan parsial CO₂ air laut, tampak pada pola sebaran $p\text{CO}_2$ (Gambar 4) di perairan Teluk Sekotong dan Teluk Kodek yang mirip dengan pola sebaran DIC (Gambar 3). Tekanan parsial CO₂ kolom air di perairan Teluk Sekotong berkisar 342,27–411,39 μatm dengan rata-rata $383,54 \pm 23,61$ μatm , lebih tinggi dibandingkan di perairan Teluk Kodek yang berkisar 217,19–269,89 μatm dengan rata-rata $252,25 \pm 20,25$ μatm . Secara umum, $p\text{CO}_2$ kolom air di perairan pesisir Lombok Barat lebih rendah

dibandingkan $p\text{CO}_2$ atmosfer terutama di perairan Teluk Kodek dan Teluk Sekotong bagian luar. Tekanan parsial CO₂ atmosfer di Teluk Sekotong dan Teluk Kodek masing-masing berkisar 336–414 μatm dan 314–390 μatm .

Fluks CO₂

Fluks atau pertukaran aliran gas CO₂ antara udara dan laut merupakan fungsi dari perbedaan konsentrasi CO₂ antara laut dan udara, daya larut, dan kecepatan transfer gas CO₂ di permukaan laut.



Gambar 5. Fluks CO₂ di wilayah studi. Nilai (+) menunjukkan pelepasan CO₂ ke atmosfer (pelepas); nilai (-) menunjukkan penyerapan CO₂ dari atmosfer (penyerap).

Figure 5. CO₂ flux in the study area. Value (+) indicates the release of CO₂ into the atmosphere (source); value (-) indicates the absorbption of CO₂ from the atmosphere (sink).

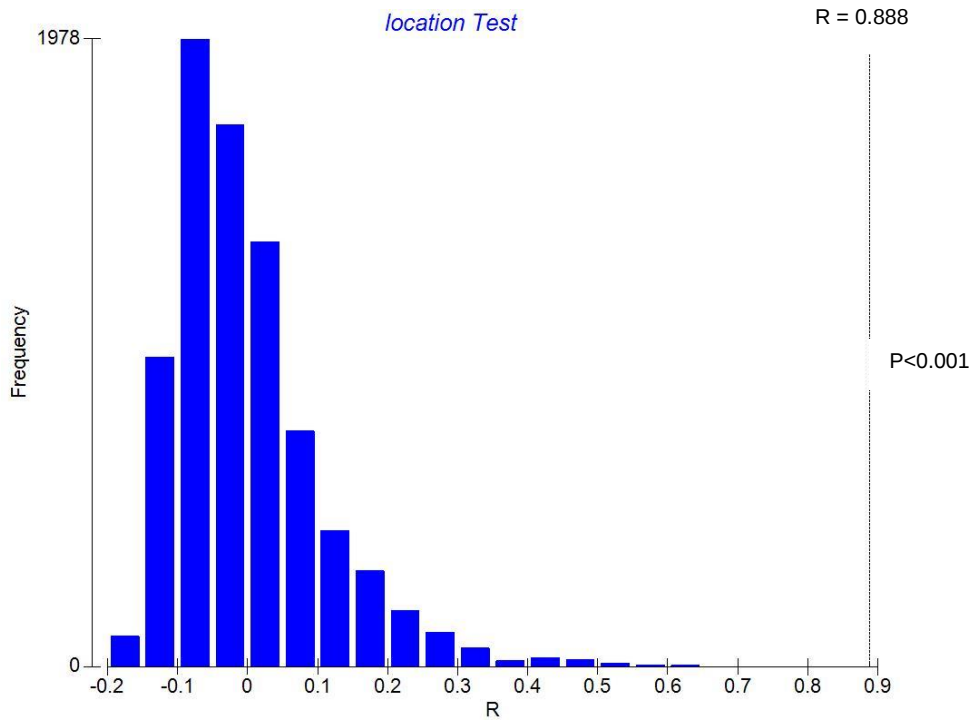
Gambar 5 menunjukkan bahwa secara umum perairan Teluk Kodek pada pengamatan April 2012 berperan sebagai penyerap CO₂ yang ditunjukkan oleh nilai fluks CO₂ yang negatif, sedangkan Teluk Sekotong berperan sebagai pelepas CO₂ yang ditunjukkan oleh nilai fluks CO₂ positif. Fluks CO₂ di perairan Sekotong berkisar -0,61–0,52 mmol.m⁻².hari⁻¹ dengan rata-rata $0,05 \pm 0,40$ mmol.m⁻².hari⁻¹. Teluk bagian dalam berperan sebagai pelepas CO₂, sedangkan teluk bagian luar berperan sebagai penyerap CO₂. Di perairan Teluk Kodek, fluks CO₂ berkisar dari -0,80 hingga -1,81 mmol.m⁻².hari⁻¹ dengan rata-rata $-1,29 \pm 0,40$ mmol.m⁻².hari⁻¹. Penyerapan CO₂ dari atmosfer disebabkan oleh tekanan parsial CO₂ dalam kolom air lebih rendah dibandingkan tekanan parsial CO₂ di atmosfer, sehingga terjadi aliran gas CO₂ dari atmosfer ke permukaan laut. Sebaliknya, laut berperan sebagai pelepas CO₂ ketika $p\text{CO}_2$ kolom air lebih tinggi dibandingkan di atmosfer, sehingga terjadi aliran CO₂ dari kolom air ke atmosfer.

Pembahasan

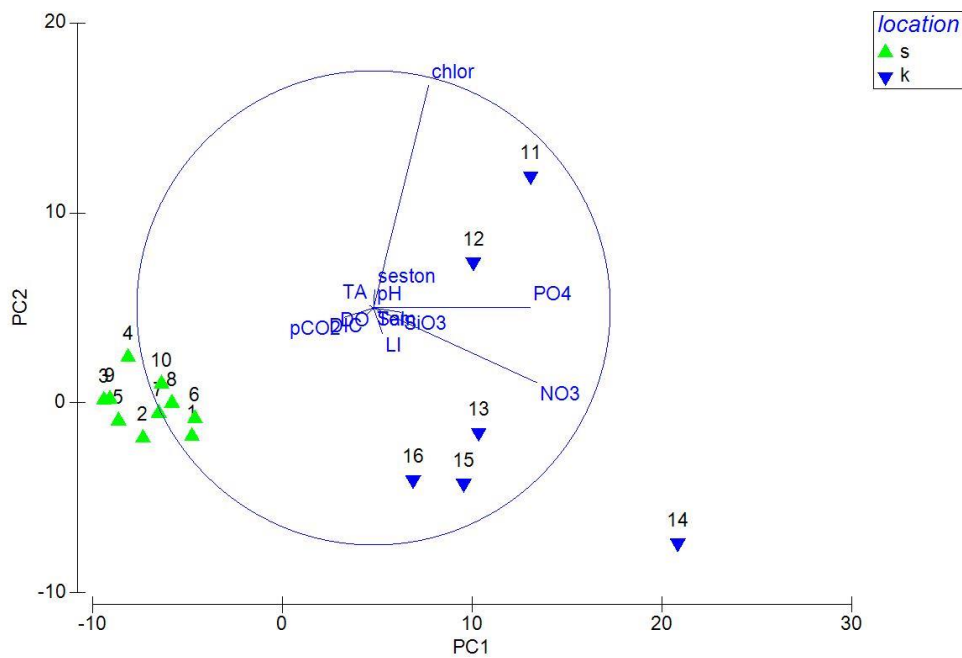
Teluk Sekotong dan Teluk Kodek mempunyai peran yang berbeda dalam pertukaran CO₂ udara-laut. Teluk Sekotong cenderung

berperan sebagai pelepas CO₂, sedangkan Teluk Kodek sebagai penyerap CO₂. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perbedaan tekanan parsial CO₂ ($p\text{CO}_2$) kolom air di antara kedua lokasi. Berdasarkan uji t untuk $p\text{CO}_2$ di kedua lokasi, $p\text{CO}_2$ di Teluk Sekotong secara signifikan ($p < 0,001$) lebih tinggi dibandingkan di Teluk Kodek. Selain itu, parameter fisika-kimia di kedua lokasi juga menunjukkan karakteristik yang berbeda (Gambar 6 dan Gambar 7).

Hasil analisis PCA menunjukkan bahwa fosfat dan nitrat merupakan faktor dominan yang memengaruhi $p\text{CO}_2$ di perairan Teluk Kodek, diikuti oleh konsentrasi klorofil-a. Fosfat dan nitrat dapat menjelaskan variasi sebesar 89,9% dan berada di komponen satu, sedangkan klorofil-a menjelaskan variasi sebesar 14,4% dan berada di komponen dua. Konsentrasi nutrisi dan klorofil-a yang tinggi mengindikasikan potensi penyerapan CO₂ oleh fitoplankton yang juga tinggi dalam proses fotosintesis. Air permukaan dapat menjadi *net* autotrofik jika CO₂ lebih banyak dikonsumsi untuk produksi biologis (Chen et al., 2008). Selain itu, Dai et al. (2009) mengemukakan bahwa $p\text{CO}_2$ dalam air laut juga dipengaruhi oleh proses metabolisme seperti fotosintesis, respirasi, presipitasi, dan disolusi kalsium karbonat yang mengubah keseimbangan massa dalam sistem karbonat.



Gambar 6. Hasil analisis *Welch Two Sample t-test* antara kedua lokasi penelitian.
Figure 6. The results of the analysis of *Welch Two Sample t-test* between the two sites.



Gambar 7. Grafik analisis komponen utama (PCA) karakteristik biofisika-kimia perairan. s = Teluk Sekotong, k = Teluk Kodek
Figure 7. Graph of principal component analysis (PCA) biophysico-chemical characteristics of the waters. s = Sekotong Bay, k = Kodek Bay.

Perairan pesisir seperti teluk, selat, dan estuari mempunyai kondisi hidrologis yang kompleks, dan $p\text{CO}_2$ permukaan laut di daerah ini

dapat secara signifikan dipengaruhi oleh massa air yang berbeda. Umumnya, arus laut dan arus pasang surut adalah dua kekuatan utama yang

membawa massa air yang berbeda ke lokasi tersebut. Perairan Teluk Kodek yang berhubungan langsung dengan Selat Lombok mempunyai massa air yang lebih besar dengan salinitas yang lebih tinggi, sehingga terjadi pengenceran yang menyebabkan $p\text{CO}_2$ kolom air turun, sehingga perairan tersebut lebih bersifat autotrofik dan menyerap CO_2 .

Pengaruh massa air Selat Lombok yang cenderung bersifat oseanik dan tidak ada sungai-sungai besar yang bermuara ke perairan tersebut menyebabkan kondisi perairan Teluk Kodek cenderung homogen. Perairan Teluk Kodek juga mempunyai tingkat kesuburan yang lebih tinggi yang ditunjukkan oleh konsentrasi nutrisi (fosfat, nitrat, silikat) dan klorofil-a yang tinggi (Tabel 1). Selain itu, keberadaan ekosistem lamun dan terumbu karang yang mendukung pulau-pulau kecil yang ada di Teluk Kodek turut mengurangi peningkatan $p\text{CO}_2$ kolom air dan memperkuat penyerapan CO_2 di perairan tersebut. Konsentrasi DIC yang tinggi di sekitar pulau-pulau kecil tersebut dapat disebabkan oleh dekomposisi ekosistem lamun. Namun, dengan kemampuan fotosintesisnya, lamun mampu memanfaatkan DIC yang sudah ada, bahkan menyerap dari atmosfer jika tidak mencukupi.

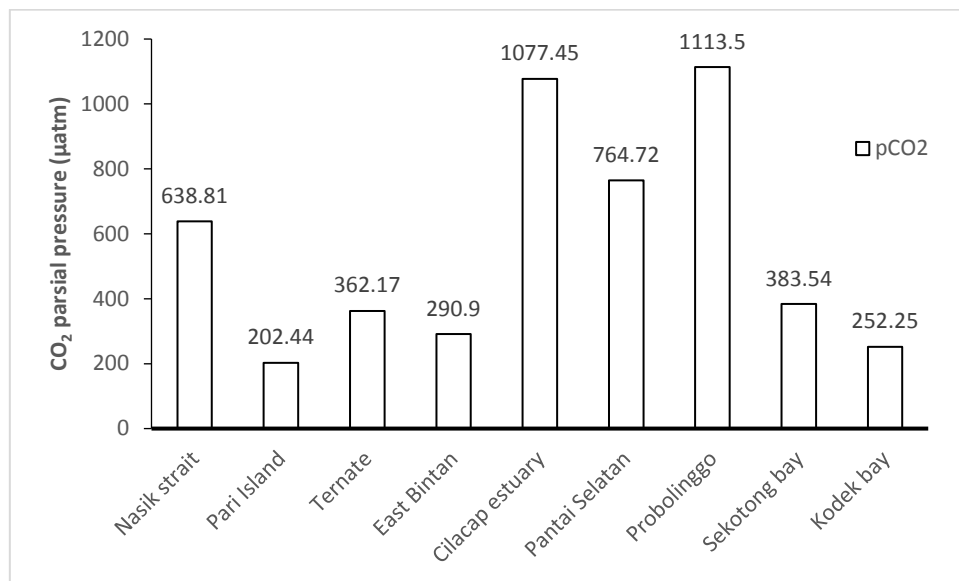
Perairan Teluk Sekotong cenderung lebih tertutup, sehingga waktu tinggal massa air menjadi lebih lama yang mengakibatkan peningkatan pengayaan DIC dan $p\text{CO}_2$, terutama di Teluk Sekotong bagian dalam. Hal yang sama terjadi di perairan sekitar komunitas bakau Ca Mau di Vietnam yang menunjukkan bahwa kombinasi dari volume air yang kecil dan waktu tinggal massa air yang lama akan meningkatkan

DIC, $p\text{CO}_2$, dan alkalinitas total serta menurunkan konsentrasi oksigen (Kone & Borges, 2008). Konsentrasi DIC dan $p\text{CO}_2$ yang tinggi di kolom air Teluk Sekotong Bagian Dalam disebabkan oleh pasokan karbon organik dan anorganik, baik yang bersifat *autochthonous* (berasal dari perairan itu sendiri) maupun *allochthonous* yang berasal dari sungai maupun ekosistem bakau. Hal ini sesuai dengan pernyataan Cai & Wang (1998) bahwa perairan pesisir menerima pasokan DIC, baik yang bersifat eksternal maupun internal. Pasokan eksternal berasal dari air tawar melalui aliran sungai, air laut dari pantai, *tidal-flush*, dan ekosistem sekitarnya, sedangkan pasokan internal berasal dari degradasi material organik (respirasi aerobik dan fotodegradasi).

Hasil ulasan sebaran $p\text{CO}_2$ di beberapa perairan pesisir Indonesia (Gambar 8, Afdal et al., 2011a; Afdal et al., 2011b; Afdal et al., 2012; Afdal & Lutan, 2012; Afdal & Giyanto, 2013; Afdal, 2015) menunjukkan bahwa ekosistem pesisir (estuaria, bakau, lamun, dan terumbu karang) memengaruhi $p\text{CO}_2$ kolom air dan fluks CO_2 udara-laut di perairan pesisir. Perairan pesisir yang mempunyai ekosistem lamun dan terumbu karang seperti Teluk Sekotong, Teluk Kodek, Selat Nasik, Pulau Pari, Ternate, dan perairan Bintan, cenderung mempunyai tekanan parsial CO_2 kolom air yang rendah dan sebagian besar berperan sebagai penyerap CO_2 dari atmosfer, sedangkan perairan pesisir yang hanya didukung oleh ekosistem bakau dan estuari seperti perairan Cilacap dan Probolinggo mempunyai tekanan parsial CO_2 kolom air yang tinggi dan berperan sebagai pelepas CO_2 ke atmosfer.

Tabel 1. Rata-rata dan kisaran parameter fisika-kimia perairan di Teluk Sekotong dan Teluk Kodek.
Table 1. Average and range of physico-chemical parameters in Sekotong and Kodek Bay waters.

Location	Temperature (°C)	Salinity (psu)	DO (mg.L ⁻¹)	PO ₄ (mg.L ⁻¹)	NO ₃ (mg.L ⁻¹)	SiO ₃ (mg.L ⁻¹)	Chl-a (mg.m ⁻³)
Sekotong Bay	29.4 ± 0.16	32.8 ± 0.42	5.43 ± 0.08	0.033 ± 0.036	0.004 ± 0.004	0.49 ± 0.46	0.53 ± 0.15
	29.1–29.6	32–33	5.33–5.6	0.00–0.09	0.00–0.009	0.216–1.76	0.341–0.802
Kodek Bay	29.58 ± 0.47	33 ± 0.00	5.40 ± 0.11	0.34 ± 0.005	0.038 ± 0.016	0.71 ± 0.17	1.10 ± 0.84
	29.2–30.4	33–33	5.26–5.56	0.29–0.41	0.03–0.07	0.503–0.949	0.404–0.414



Gambar 8. Perbandingan $p\text{CO}_2$ perairan Teluk Sekotong dan Teluk Kodek dengan perairan pesisir lain di Indonesia.

Figure 8. The comparison of $p\text{CO}_2$ in Sekotong and Kodek Bay waters with other coastal waters in Indonesia.

Ekosistem padang lamun dan terumbu karang mempunyai peran yang berbeda dalam penyerapan dan pelepasan CO_2 , sangat tergantung pada kondisi kedua ekosistem. Ekosistem padang lamun mempunyai peranan yang penting dalam siklus karbon di laut karena menghasilkan produksi primer yang tinggi dan mampu menyimpan karbon dalam jumlah yang besar dalam waktu yang lama, baik pada organ tumbuhan maupun dalam sedimen (Duarte et al., 2005; Fourqurean et al., 2012), sehingga perairan-perairan yang didukung oleh ekosistem lamun cenderung berperan sebagai penyerap CO_2 . Di perairan dengan ekosistem lamun yang terganggu seperti ekosistem lamun Pulau Pari, peranan sebagai penyerap CO_2 dari atmosfer terjadi pada musim barat dengan suhu sebagai faktor yang sangat berpengaruh dari empat musim yang terukur (Rustam et al., 2014). Berdasarkan neraca karbon yang terjadi di ekosistem lamun Pulau Pari, besar pelepasan CO_2 ke atmosfer sangat kecil dibandingkan dengan produksi daun yang dihasilkan, sehingga pemanfaatan CO_2 untuk fotosintesis lebih banyak memanfaatkan CO_2 dalam air, yang dalam hal ini DIC spesies bikarbonat yang berasal dari aktivitas antropogenik (sungai, serasah bakau dan daratan Pulau Pari) (Rustam, 2014).

Perairan sekitar ekosistem terumbu pada kondisi normal adalah sedikit melepas CO_2 ke atmosfer, dikarenakan proses kalsifikasi

(pembentukan kalsium karbonat) (Ware et al., 1992). Di perairan terumbu karang, produksi primer kotor dan respirasi oleh zooxanthella hampir seimbang dan produksi bersih mendekati nol, sehingga kalsifikasi bersih merupakan proses utama yang memengaruhi sistem CO_2 air laut di ekosistem terumbu karang (Gattuso et al., 1996). Pembentukan kalsium karbonat meningkatkan konsentrasi CO_2 , tapi pada saat yang sama proses ini mengonsumsi 2 mol bikarbonat (HCO_3^-) untuk 1 mol CaCO_3 yang terbentuk. Perilaku berlawanan tersebut menyebabkan total alkalinitas (TA) dan DIC berkurang dengan perbandingan 2:1 (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2001). Namun, pada perairan yang sudah terganggu, perairan di sekitar ekosistem terumbu karang bisa berperan sebagai penyerap CO_2 , seperti yang terjadi di perairan sekitar terumbu karang Pulau Pari (Afdal & Lutan, 2012). Gattuso et al. (1996) mengemukakan bahwa terumbu tepi yang tumbuh di lokasi yang banyak terdapat aktivitas antropogenik telah bergeser dari dominasi karang ke dominasi makroalga, seperti yang terjadi di terumbu Shiraho, Pulau Ryukyu. Kondisi ini akan menyebabkan peningkatan produksi ekosistem bersih dan penurunan kalsifikasi, sehingga memungkinkan terjadinya pergeseran peran ekosistem terumbu karang dari pelepas menjadi penyerap untuk CO_2 atmosfer.

Kesimpulan

Teluk Kodek berperan sebagai penyerap CO₂ dari atmosfer karena dipengaruhi oleh massa air Selat Lombok yang mempunyai konsentrasi nutrisi dan klorofil-a yang tinggi. Keberadaan ekosistem lamun dan terumbu karang yang mendukung pulau-pulau kecil yang ada di Teluk Kodek turut mengurangi peningkatan pCO₂ kolom air dan memperkuat penyerapan CO₂ di perairan tersebut. Teluk Sekotong bagian dalam berperan sebagai pelepas CO₂ karena perairan Teluk Sekotong cenderung lebih tertutup, sehingga waktu tinggal massa air menjadi lebih lama yang mengakibatkan peningkatan pengayaan DIC dan pCO₂.

Persantunan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sumidjo Hadi Riyono yang telah membantu dalam pekerjaan di lapangan dan analisis di laboratorium. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Hendra Sihalo, MSc yang telah membantu dalam analisis statistik.

Daftar Pustaka

- Afdal. 2015. Sebaran tekanan parsial CO₂ (pCO₂) di perairan pesisir Probolinggo. In A. S. Admadipoera (Eds). *Prosiding Seminar Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XI ISOI*, 17–18 November 2014, Balikpapan. p. 31–38.
- Afdal & Giyanto. 2013. Sebaran tekanan parsial CO₂ (pCO₂) di perairan Ternate dan sekitarnya. *Jurnal Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 39(1): 95–105.
- Afdal, RF Kaswadji & AF Koropitan. 2012. Pertukaran gas CO₂ udara–laut di perairan Selat Nasik, Belitung. *Jurnal Segara*, 18(1): 9–17.
- Afdal & RY Luthan. 2012. Sistem CO₂ di perairan ekosistem pesisir, studi kasus di perairan selat Nasik, Belitung dan Pulau Pari, Kepulauan Seribu. In R. Nuchsin, Pramudji, M. Muchtar & Fahmi (Eds). *Kondisi Lingkungan Pesisir Perairan Pulau Bangka Belitung*. Pusat Penelitian Oseanografi, LIPI Jakarta. p. 73–86.
- Afdal, LM Panggabean & DR Noerjito. 2011a. Fluks karbondioksida, hubungannya dengan produktivitas primer fitoplankton di perairan Estuari Donan, Cilacap. *Jurnal Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 37(2): 323–337.
- Afdal, LM Panggabean & AF Koropitan. 2011b. Pertukaran Gas CO₂ udara–laut di perairan pantai Selatan Yogyakarta. Dipresentasikan pada seminar ISOI di Makassar, 26–27 Sep 2011.
- APHA. 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. M.A.N. Franson (ed.), Port City Press, Baltimore (MA).
- Borges AV, B Delille & M Frankignoulle. 2005. Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystems counts. *Geophys Res Lett*, 32: L14601. doi:10.1029/2005GL023053
- Borges AV. 2011. Present day carbon dioxide fluxes in the coastal ocean and possible feedbacks under global change. In Oceans and the atmospheric carbon content. Duarte PMS and JMS Casiano(Eds). p. 47–77.
- Cai WJ & Y Wang. 1998. The chemistry, fluxes, and sources of carbon dioxide in the estuarine waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia. *Limnology and Oceanography*, 43(4): 657–668.
- Chen CTA & AV Borges. 2009. Reconciling views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystem as sources of atmospheric CO₂. *Deep-Sea Res II*, 56: 578–590.
- Chen CTA, W Zhai & M Dai. 2008. Riverine input and air–sea CO₂ exchanges near the Changjiang (Yangtze River) estuary: Status quo and implication on possible future changes in metabolic status. *Continental Shelf Research*, 28: 1476–1482.
- Clarke KR & RM Warwick. 2001. *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth, United Kingdom, PRIMER-E Ltd.
- Cochlan WP & J Hendorn. 2012. *Water Quality Methods*. Cochlan Phytoplankton Ecophysiology Laboratory. Romberg Tiburon Center for Environmental Studies San Francisco State University. Tiburon, CSA, USA. 317 pp.
- Dai M, Z Lu, W Zhai, B Chen, Z Cao, K Zhou, WJ Cai & CTA Chen. 2009. Diurnal variations of surface seawater pCO₂ in contrasting coastal environments. *Limnol Oceanogr*, 54(3): 735–745.
- Dickson AG, CL Sabine & JR Christian. 2007. *Guide to best practices for ocean CO₂ measurements*. Pices special publication 3. IOCCP Report 8: 196 pp.

- Duarte CM, JJ Middleburg & N Caraco. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeoscience*, 2: 1–8.
- Fourqurean JW, CM Duarte, H Kennedy, N Marba, M Holmer, MA Mateo, ET Apostolaki, GA Kemdrick, D Krause-Jensen, KJ McGlathery & O Serrano. 2012. Seagrass ecosystem as a globally significant carbon stock. *Nature geoscience*, 1–5.
- Gattuso JP, M Pichon, B Delesalle, C Canon & M Frankignoulle. 1996. Carbon fluxes in coral reefs. I. Lagrangian measurement of community metabolism and resulting air–sea CO₂ disequilibrium. *Mar Ecol Prog Ser*, 145: 109–121.
- Giggenbach WF & RL Goguel. 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.
- Grasshoff K. 1976. *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, Weinheim. New York.
- Kone YJM & AV Borges. 2008. Dissolved inorganic carbon dynamics in the waters surrounding forested mangroves of the Ca Mau Province (Vietnam). *Estu Coas Shelf Sci*, 77(3): 409–421.
- Liu KK, L Atkinson, CTA Chen, S Gao, J Hall, RW MacDonald, L Talaue-McManus & R Quinones. 2000. Exploring Continental Margin Carbon Fluxes on a Global Scale. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 81: 641–644.
- Lewis E & D Wallace. 1997. CO₂ SYS. *Program Developed for CO₂ System Calculations*. Department of Applied Science, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York. 17 pp.
- Muchtar M, Ruyitno, SM Natsir, MH Azkab, Fahmi, H Thoha & S Lastrini. 2013. *Ekspedisi Widya Nusantara 2010*. Pusat Penelitian Oseanografi LIPI. 81 pp.
- Murray SP & D Arief. 1988. Throughflow into the Indian Ocean through the Lombok Strait, January 1985–January 1986. *Nature*, 333: 444–447. doi:10.1038/333444a0.
- Orr JC, R Najjar, CL Sabine & F Joos. 1999. Internal OCMIP report. Lab. des Sci. du Clim. et de l’Environ./Comm. à l’Energie Atom, Gif-SuryVette. France. 29 pp.
- Rustam A, WS Pranowo, TL Kepel, NS Adi, B Hendrajana. 2013. Peran Laut Jawa dan Teluk Banten sebagai Pelepas dan/atau Penyerap CO₂. *J Segara*, 9(1): 75–84.
- Rustam A, DG Bengen, Z Arifin & JL Gaol. 2014. Dinamika *Dissolved Inorganic Carbon (DIC)* di Ekosistem Lamun Pulau Pari. *J Segara*, 10(1): 31–41.
- Rustam A. 2014. Kontribusi Lamun dalam Regulasi Karbon dan Stabilisasi Ekosistem. *Disertasi*. Bogor. IPB.
- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org/>.
- Takahashi T, SC Sutherland, C Sweeney, A Poisson, N Metzl, B Tilbrook, N Bates, R Wanninkhof, RA Feely, C Sabine, J Olafsson & Y Nojiri. 2002. Global sea–air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂ and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research Part II*, 1601–1622.
- Ware JR, SV Smith & ML Reaka-kudla. 1992. Coral reefs: Sources or sinks of atmospheric CO₂? *Coral reefs*, 11: 127–130.
- Zeebe RE & D Wolf-Gladrow. 2001. *CO₂ in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*. Elsevier Science B.V, Amsterdam. 346 pp.