

ISSN 0853 - 7291

Volume 1, Edisi Khusus, Februari 2010

# ILMU KELAUTAN

Indonesian Journal of Marine Sciences



IK	Vol. 1	Edisi Khusus	Hlm. 1 - 234	Semarang Februari 2010	ISSN 0853 - 7291
----	--------	--------------	--------------	------------------------	------------------



JURUSAN ILMU KELAUTAN UNIVERSITAS DIPONEGORO  
KAMPUS ILMU KELAUTAN TEMBALANG, TELP./FAX. 024 7474698  
SEMARANG - INDONESIA - 50239

Online Submission: [www.ik-ijms.com](http://www.ik-ijms.com). Accredited No. 83/DIKTI/KEP/2009



**DAFTAR ISI**  
**VOLUME 1, EDISI KHUSUS, FEBRUARI 2010**

- Variabilitas Kejadian Siklon Tropis di Samudra Hindia Bagian Selatan**  
*Adyarto Raharjo, Ivonne M. Radjawane & Agus Setiawan* Hal. 1
- Pemodelan Perubahan Garis Pantai Timur Tarakan, Kalimantan Timur**  
*Anhita Triwahyuni, Mulia Purba & Syamsul B. Agus* Hal. 9
- Kondisi Nutrien dan PH Perairan Teluk Ambon Tahun 2009**  
*Donna Siahaya & Mutiara R. Putri* Hal. 24
- Struktur Geologi Bawah Dasar Laut Perairan Singkawang Kalimantan Barat Berdasarkan Penafsiran Rekaman Seismik Strata Box**  
*Hananto Kurnio & Noor Cahyo Dwi Aryanto* Hal. 36
- Variabilitas Suhu dan Salinitas di Perairan Barat Sumatera dan Hubungannya dengan Angin Muson Serta *Indian Ocean Dipole Mode (IODM)***  
*Holiludin & Mulia Purba* Hal. 49
- Deteksi *Mesoscale Eddies* dari Satelit dan Hubungannya dengan Hasil Tangkapan Ikan Tuna Mata Besar (*Thunnus obesus*) di Perairan Selatan Jawa**  
*Jonson Lumban Gaol & Bisman Nababan* Hal. 68
- Pemodelan Pola Sebaran Tumpahan Minyak pada Berbagai Jenis Minyak yang Berbeda di Pelabuhan Tanjung Priok**  
*Sabhan, Eko Effendi, M. Tri Hartanto & Andri Purwandani* Hal. 77
- Model Elevasi Digital untuk Mendeteksi Kerusakan Terumbu Karang di Taman Wisata Alam Laut Kapoposang, Sulawesi Selatan**  
*Ahmad Faizal & Jamaluddin Jompa* Hal. 87
- Evaluasi Citra Quickbird untuk Pemetaan Batimetri Gobah Dengan Menggunakan Data Perum: Studi Kasus Gobah Karang Lebar dan Pulau Panggang**  
*Vincentius Paulus Siregar & Muhammad Banda Selamat* Hal. 99
- Pemantauan Konsentrasi Total Padatan Tersuspensi di Perairan Delta Cimanuk, Jawa Barat, Menggunakan Citra Landsat Multi Temporal**  
*Tb. Solihuddin* Hal. 110





- 
- Distribusi Spasial Karang Lunak *Sinularia Flexibilis* di Perairan Pulau-Pulau Selayar**  
*Abdul Haris, Syafyudin Yusuf & Husnul Fuadi* Hal. 119
- Penentuan Indeks Kerentanan Ekosistem Terumbu Karang Menggunakan Pemodelan Spasial Berbasis Sel di Gugusan Pulau Pari, Kepulauan Seribu**  
*Herkiki S. Widyayanto, Muhammad Helmi, Munasik & Sam Wouthuyzen* Hal. 131
- Analisis Pertumbuhan Linear Koral Sebagai Perekam Perubahan Kondisi Lingkungan (Studi Kasus Koral Kepulauan Seribu)**  
*Ida Ayu Purnamasari, Sri Yudawati Cahyarini & Mutiara R. Putri* Hal. 142
- Karakteristik Genetika Karang *Goniopora* spp. (Cnidaria: Scleractinia) Berdasarkan Penanda Genetik mtDNA COI dan Daerah ITS rDNA**  
*Neviaty P. Zamani* Hal. 151
- Mikrofauna (Foraminifera) Terumbu Karang Sebagai Indikator Perairan Sekitar Pulau-Pulau Kecil**  
*Kresna Tri Dewi, Suhartati M. Natsir & Yudi Siswantoro* Hal. 162
- Pengukuran Transmisi dan Refleksi Akustik Bawah Air di *Water Tank***  
*Henry M. Manik* Hal. 171
- Aplikasi Metoda Pelampung GPS untuk Pengamatan Variasi Tinggi Muka Laut**  
*Imam Mudita* Hal. 178
- Gerakan Buoy di Hubungkan dengan Lingkungan Laut Kepulauan Seribu**  
*James P. Panjaitan* Hal. 195
- Kajian Numerik Daun Propeller Bersirip Dua untuk Kapal**  
*Handy Chandra* Hal. 203
- Trend Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a serta Dampaknya terhadap Penyerapan CO<sub>2</sub> di Perairan Indonesia** ✓  
*Bisman Nababan & Jonson L. Gaol* Hal. 213
- Pemetaan dan Analisis Spasial Kondisi Sumur Permukaan di Pulau Pandangan**  
*Muhammad Banda Selamat, Khairul Amri & Ahmad Bahar* Hal. 228

## Trend Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a serta Dampaknya terhadap Penyerapan CO<sub>2</sub> di Perairan Indonesia

Bisman Nababan<sup>1\*</sup> dan Jonson L. Gaol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor. Email: [bisman@ipb.ac.id](mailto:bisman@ipb.ac.id)

### Abstrak

Trend suhu permukaan laut (SPL) dan konsentrasi klorofil-a dalam dua dekade terakhir dianalisa untuk mempelajari dampaknya terhadap laju penyerapan gas CO<sub>2</sub> di perairan Indonesia. Data SPL (Juli 1990-Desember 2008) dan konsentrasi klorofil-a (Oktober 1997-Desember 2008) merupakan data rata-rata bulanan dan diperoleh dari NASA website (<http://poet.jpl.nasa.gov> dan <http://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Secara umum, SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia berfluktuasi setiap tahun dan umumnya dipengaruhi oleh Angin Muson dan sirkulasi massa air laut. Nilai SPL di perairan Indonesia tercatat 25,0°C- 31,0°C dengan nilai rata-rata sebesar 28,97°C. Secara umum, trend SPL di perairan Indonesia bernilai positif. Sebaliknya, trend konsentrasi klorofil-a secara umum bernilai negatif kecuali di dua lokasi yaitu perairan Timor dan Arafura. SPL yang relatif tinggi dengan trend positif dapat meningkatkan tekanan parsial CO<sub>2</sub> dan menurunkan laju pelarutan gas CO<sub>2</sub> di permukaan laut sehingga mengakibatkan perairan Indonesia berpotensi sebagai pelepas karbon. Trend negatif konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia juga mengindikasikan bahwa laju uptake gas CO<sub>2</sub> dari atmosfer cenderung menurun dari tahun-tahun sebelumnya. Disamping faktor SPL yang cenderung meningkat dan konsentrasi klorofil-a yang cenderung menurun, banyaknya sungai-sungai yang bermuara ke perairan Indonesia dapat memasok nutrisi dan bahan organik lainnya dalam jumlah besar yang pada akhirnya akan terlepas ke atmosfer setelah melalui proses daur ulang sehingga perairan Indonesia berpotensi sebagai pelepas karbon (net carbon source).

**Kata kunci:** SPL, konsentrasi klorofil-a, perairan Indonesia, CO<sub>2</sub>, pelepas karbon

### Abstract

Trends of sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a concentration in the last two decades were analyzed to study their impacts on the rate of CO<sub>2</sub> absorption in Indonesian waters. Data of SST (July 1990-December 2008) and chlorophyll-a concentration (October 1997-December 2008) were monthly average and obtained from NASA website (<http://poet.jpl.nasa.gov> and <http://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov>). In general, the SST and chlorophyll-a concentration in Indonesian waters fluctuated each year and were generally influenced by the Monsoon winds and the circulation of Indonesian water masses. SST values in Indonesian waters were from 25,0°C- 31,0°C with average of 28,97°C. In general, the SST trends of Indonesian waters were positive. In contrast, generally, the trends of chlorophyll-a concentrations were negative except in two locations of the Timor and Arafura waters. Relatively high SST with positive trends could increase the partial pressure of CO<sub>2</sub> and reduce the rate of CO<sub>2</sub> gas solubility in sea water resulting that Indonesian waters were potential to release carbon. Negative trends of chlorophyll-a concentrations of Indonesian waters also indicated that the rate of CO<sub>2</sub> uptake from the atmosphere tends to decrease from previous years. In addition to SST and chlorophyll-a concentration trends, the number of rivers emptying into Indonesian waters can supply nutrients and other organic materials in large quantities that will eventually released into the atmosphere after the recycling process, therefore, the Indonesian waters has the potential to release carbon (net carbon source).

**Key words:** SST, chlorophyll-a concentration, Indonesian waters, CO<sub>2</sub>, carbon source.



## Pendahuluan

Pemanasan global yang terjadi dalam tiga dekade terakhir ini terjadi sebagai akibat dari peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer seperti CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan CFCs (NOAA, 2008; Boden *et al.*, 1994; Neftel *et al.*, 1994; Keeling & Whorf, 1994; Khalil & Rasmussen, 1994; Elkins *et al.*, 1994). Khusus untuk gas CFCs tidak lagi memberikan pengaruh utama dalam prediksi pemanasan global sampai pada tahun 2100 setelah protokol Montreal menghapuskan produksi CFCs (IPCC, 1992). Bila dibandingkan dengan suhu permukaan rata-rata tahunan periode 1951-1980, maka suhu permukaan rata-rata tahunan global meningkat secara significant mulai dari sekitar 0,1°C pada tahun 1981 sampai dengan sekitar 0,5°C pada tahun 2009. Peningkatan suhu global ini seiring dengan meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer khususnya pada tiga dekade terakhir ini (NASA, 2010). Bila tidak ada pengurangan emisi gas rumah kaca ke atmosfer secara nyata, beberapa model telah memprediksikan kenaikan suhu permukaan global pada tahun 2100 sekitar 2,1°C sampai 4,6°C dibandingkan dengan suhu permukaan global pada tahun 1990 (IPCC, 1997; Titus & Narayanan, 1995).

Emisi gas CO<sub>2</sub> ke atmosfer sebagai hasil pembakaran bahan bakar fosil oleh kegiatan manusia dianggap sebagai penyebab utama pemanasan global (Solomon *et al.*, 2007). Berdasarkan hasil pengukuran gas CO<sub>2</sub> di Mauna Loa, Hawaii dan Kutub Selatan, diperoleh konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang terus meningkat dari sekitar 315 ppmv (1959) sampai sekitar 385 ppmv (2008) (NASA, 2010; Keeling & Whorf, 1994). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> di atmosfer sekitar 1,4 ppmv/tahun selama 50 tahun terakhir. Berdasarkan monitoring konsentrasi gas CO<sub>2</sub> ini, diperoleh juga trend peningkatan yang mendekati garis linear (NASA, 2010; Keeling & Whorf, 1994). Peningkatan gas CO<sub>2</sub> di atmosfer yang secara konsisten terus

naik menimbulkan beberapa pertanyaan para ilmuwan akhir-akhir ini mengingat sebelumnya diyakini bahwa laut berperan aktif sebagai penyerap gas CO<sub>2</sub>.

Laut dapat menyerap gas CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang sangat besar melalui dua proses yaitu: (1) melalui reaksi bebas (*solubility pump*) antara gas CO<sub>2</sub> dengan air yang membentuk asam karbonat dan bikarbonat; dan (2) melalui serapan aktif (*biological pump*) oleh tumbuhan (fitoplankton) di permukaan yang menyerap gas CO<sub>2</sub> melalui proses fotosintesis dengan kandungan klorofil dan bantuan sinar matahari untuk menghasilkan karbohidrat ( $H_2O + CO_2 + \text{cahaya} + \text{klorofil} \rightarrow C_2H_{12}O_6 + 6O_2$ ). Dalam proses reaksi bebas (*solubility pump*), reaksi gas CO<sub>2</sub> dengan H<sub>2</sub>O membentuk asam karbonat maupun reaksi sebaliknya berlangsung dengan sangat cepat sehingga menjadi sulit membedakan antara gas CO<sub>2</sub> dan asam karbonat di dalam air laut ( $H_2O + CO_2 \leftrightarrow H_2CO_3$ ) (Millero, 2006). Dalam proses reaksi bebas ini, air dingin di lintang tinggi mempunyai tingkat penyerapan dua kali lebih tinggi dibandingkan dengan air hangat di daerah tropis.

Hasil penelitian ESA (2009) menunjukkan bahwa laut dan daratan Artic berfungsi sebagai penyerap karbon yang penting dan significant semenjak akhir *ice age* sampai akhir-akhir ini antara 0-25% dari *global net sink* gas CO<sub>2</sub>. Namun, ESA (2009) mengingatkan dengan peningkatan pemanasan global yang begitu cepat terjadi akhir-akhir ini akan dapat merubah fungsi laut dan daratan Artic menjadi sumber karbon. Secara umum, Houghton (2007) dan Sabine *et al.* (2004) menjelaskan bahwa laut memiliki peran penting dalam penyerapan gas CO<sub>2</sub> sebanyak 20-35% dari total hasil emisi pembakaran bahan bakar fosil oleh kegiatan manusia.

Khusus dalam proses *biological pump*, laut selatan (selatan lintang 30°S) memiliki peran sangat penting karena sekalipun lautan ini relatif sempit namun lautan ini mampu menyerap gas CO<sub>2</sub> sekitar 35% dari total absorpsi gas CO<sub>2</sub> (Libes, 1992). Penelitian dalam proses *biological*



*pump* dengan penambahan zat besi di Laut Selatan juga menunjukkan hasil yang nyata terhadap perkembangan fitoplankton dan peningkatan penyerapan gas karbondioksida yang signifikan dari atmosfer (Watson *et al.*, 2000; Watson, 1997).

Peningkatan suhu permukaan global yang meningkat dengan nyata akhir-akhir ini secara teoritis dapat mengakibatkan tingkat penyerapan gas CO<sub>2</sub> menjadi berkurang. Sementara itu konsentrasi gas CO<sub>2</sub> di atmosfer juga meningkat secara significant dari tahun ke tahun. Kedua hal ini mengakibatkan penelitian tentang fungsi laut sebagai pengendali iklim global semakin meningkat dan berkembang. Bishop & Wood (2009) melaporkan bantahan terhadap hipotesis John Martin yang menyebutkan bahwa penambahan zat besi ke laut dapat merubah iklim global. Penelitian Bishop & Wood (2009) dengan proyek SOFeX (the Southern Ocean Iron Experiment) yang dilaksanakan mulai tahun 2002 di perairan antara New Zealand dan Antartika dengan menggunakan alat deteksi *carbon explorer* pada kedalaman 800 meter memperoleh hasil yang mengejutkan bahwa sebagian besar karbon dari hasil *blooming fitoplankton* hasil penambahan zat besi dipermukaan tidak pernah sampai ke perairan dalam (deep ocean). Hal ini menjelaskan bahwa sekalipun terjadi *blooming fitoplankton* sebagai akibat penambahan zat besi di permukaan namun tidak berpengaruh nyata terhadap absorpsi gas CO<sub>2</sub> dari atmosfer karena tidak terjadi presipitasi karbon ke laut yang lebih dalam secara nyata.

Park (2009) menjelaskan bahwa kemampuan lautan untuk menyerap gas CO<sub>2</sub> dari atmosfer telah berkurang sebagai akibat dari kemungkinan berobahnya sirkulasi lautan atau hanya karena peningkatan suhu permukaan. Hasil ini didukung oleh hasil penelitian Khatiwala *et al.* (2009) yang menyimpulkan bahwa peningkatan laju penyerapan gas CO<sub>2</sub> oleh lautan yang meningkat secara significant semenjak tahun 1950-an telah mengalami penurunan laju penyerapan gas CO<sub>2</sub> pada beberapa dekade terakhir ini. Hasil penelitian sebelumnya

yang di Lautan Atlantik Utara menunjukkan bahwa tekanan parsial gas karbondioksida dalam air laut telah meningkat lebih cepat dibandingkan dengan tekanan parsialnya di atmosfer khususnya pada saat musim panas yang mengakibatkan peningkatan pelepasan gas karbondioksida ke atmosfer, padahal sebelumnya daerah ini dikenal sebagai *net carbon sink* Lefevre *et al.* (2004). Hal yang sama juga ditemukan oleh CNRS (2009) di Lautan Hindia Selatan. Le Quere *et al.* (2007) yang menyimpulkan bahwa penyerapan gas karbondioksida oleh Lautan Selatan telah melemah sebesar 15% per dekade semenjak 1981 dan akan menjadi kurang efisien pada masa depan.

Data penyerapan (*sink*) atau pelepasan (*source*) gas CO<sub>2</sub> untuk perairan Indonesia sampai saat ini masih sangat terbatas dan hal ini masih merupakan perdebatan hangat diantara kalangan ilmuwan maupun pemerintah khususnya dalam upaya peningkatan peranan lautan dalam penurunan pemanasan global. Paper ini bertujuan untuk mempelajari trend SPL dan konsentrasi klorofil-a dari data satelit dan dampaknya terhadap penyerapan atau pelepasan gas CO<sub>2</sub> di perairan Indonesia.

## Materi dan Metode

### Data dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data satelit dari National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR) untuk suhu permukaan laut (SPL) dan data satelit ocean color sensor Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) untuk konsentrasi klorofil-a. Data SPL merupakan data rata-rata bulanan selama 18,5 tahun (Juli 1990 – Desember 2008) dan diperoleh dari NASA website (<http://poet.jpl.nasa.gov>). Data konsentrasi klorofil-a juga merupakan data rata-rata bulanan selama 11,3 tahun (Oktober 1997-Desember 2008) dan diperoleh dari website milik NASA (<http://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov>).



Untuk mengkuantifikasi nilai SPL, konsentrasi klorofil-a serta memperoleh trend SPL dan konsentrasi klorofil-a diambil beberapa lokasi yang dianggap dapat mewakili perairan Indonesia seperti terlihat pada Gambar 1 dan Tabel 1.

**Analisis Data**

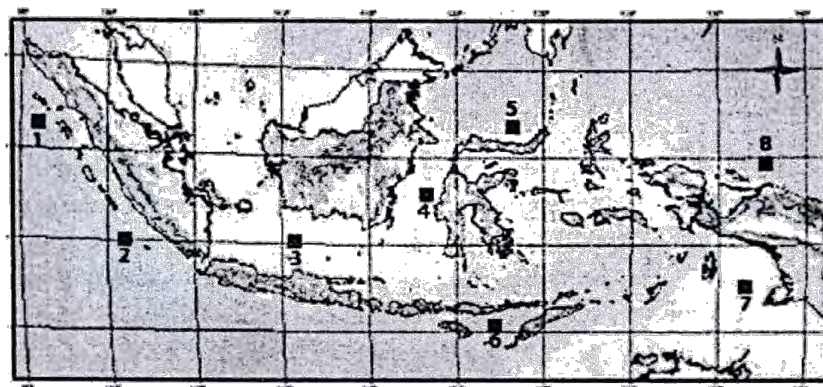
Data SPL yang digunakan merupakan data SPL Pathfinder versi 5.0 dengan resolusi 4 km x 4 km. Data SPL untuk masing-masing lokasi (S-1 sampai S-8) diekstrak dari luasan 1° x 1° atau sekitar 110 km x 110 km.

Algoritma yang digunakan untuk menduga nilai SPL dari data satelit adalah algoritma nonlinear SST (NLSST) (Walton, 1988) dengan modifikasi untuk sensor kalibrasi dan koefisien seperti berikut:

$$SST = a + b * T_4 + c * (T_4 - T_5) * T_{surf} + d * (\sec(q) - 1) * (T_4 - T_5)$$

dimana; SST adalah *sea surface temperature* (suhu permukaan laut),  $T_4$  dan  $T_5$  merupakan suhu kecerahan dari AVHRR channel 4 dan 5,  $q$  adalah sudut zenith dari satelit,  $T_{surf}$  merupakan dugaan NLSST klimatologi,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , dan  $d$  merupakan konstanta. Tingkat ketelitian algoritma ini untuk menduga SPL adalah  $\leq 0,5^\circ C$  (Li *et al.*, 2001).

Data konsentrasi klorofil-a yang digunakan dalam penelitian ini adalah data satelit SeaWiFS level 3 dengan resolusi spasial 9 x 9 km<sup>2</sup>. Data diproses oleh NASA dan di *download* dari website milik NASA. Untuk mengkuantifikasi data konsentrasi klorofil-a, data konsentrasi klorofil-a diekstrak dari luasan 1° x 1° atau sekitar 110



**Gambar 1.** Lokasi Ekstrak (Kotak 1-8) Nilai SPL dari Satelit NOAA-AVHRR dan Konsentrasi Klorofil-a dari Satelit SeaWiFS di Perairan Indonesia (Base Map diambil dari <http://www.google.co.id>).

**Table 1.** Lokasi Ekstrak Nilai SPL dari NOAA-AVHRR dan Konsentrasi Klorofil-a dari Satelit SeaWiFS.

No.	Stasiun	Lokasi Wilayah Perairan
1.	S-1	Perairan Barat Sumatra Utara
2.	S-2	Perairan Barat Sumatra Barat
3.	S-3	Lat Jawa
4.	S-4	Selat Makassar
5.	S-5	Perairan Sulawesi Utara
6.	S-6	Perairan Timor
7.	S-7	Perairan Biak
8.	S-8	Perairan Arafura

km x 110 km untuk setiap stasiun. Pendugaan konsentrasi klorofil-a dilakukan dengan menggunakan algoritma OC4v4. Algoritma OC4v4 menggunakan nilai tertinggi dari rasio kanal 443 nm, 490 nm dan 510 nm dengan kanal 555 nm untuk menentukan nilai konsentrasi klorofil-a dengan persamaan sebagai berikut (O'Reilly *et al.*, 1998):

$$Ca = 10^{0,366 - 3,067R + 1,930R^2 + 0,649R^3 - 1,532R^4}$$

dimana;

$$R = \log_{10} \left[ \frac{Rrs443}{Rrs555} > \frac{Rrs490}{Rrs555} > \frac{Rrs510}{Rrs555} \right],$$

Ca = Konsentrasi klorofil-a (mg/m<sup>3</sup>),

R = Rasio reflektansi, dan

Rrs = *Remote sensing reflectance*.

Untuk analisis selanjutnya digunakan deskriptif statistik dengan mengambil slope (trend) dari persamaan regresi linear.

## Hasil dan Pembahasan

### Trend Suhu Permukaan Laut

Trend suhu permukaan laut di berbagai lokasi pada perairan Indonesia selama kurun waktu sekitar 18 tahun terakhir selengkapnya disajikan pada Tabel 2, Gambar 2a, dan 2b. Secara umum trend suhu permukaan laut di perairan Indonesia selama periode 18 tahun (Juli 1990-Desember 2008) cenderung meningkat dengan trend (slope) yang relative rendah (0.00002 – 0.00008). Secara statistik, nilai trend suhu permukaan laut di perairan Indonesia masih tergolong sangat rendah namun bernilai positif. Hal ini menunjukkan bahwa kecenderungan pola suhu permukaan laut di perairan Indonesia selama dua dekade terakhir ini cenderung meningkat. Kisaran suhu permukaan laut di perairan Indonesia berada pada nilai minimum yaitu 25,0°C (terjadi pada saat terjadinya *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) pada Agustus 1994 di perairan Arafura) dan maximum 31,0°C (perairan Arafura; November 2000) (Gambar 2a, 2b)

Secara umum pola fluktuasi suhu permukaan laut di perairan barat Sumatra

Utara dan perairan barat Sumatra Barat memiliki pola yang relatif sama dimana nilai SPL maximum ditemui pada periode bulan Mei, Juni, dan Juli sedangkan nilai minimum ditemui pada periode bulan Oktober, November, dan Desember. Nilai minimum dan maximum di dua lokasi perairan ini secara berturut-turut tercatat sebesar 25,9°C (November 1997) dan 30,7°C (Juni, 1998) (Gambar 2a). Pola fluktuasi suhu permukaan laut di perairan barat Sumatra Utara dan Sumatra Barat banyak dipengaruhi oleh kondisi angin musiman yaitu Angin Muson (Wyrcki, 1961; Quadfasel and Cresswell, 1992, Sprintall *et al.*, 1999). Pada saat Angin Muson Barat Laut (*Northwest Monsoon*; Desember - Maret), angin yang relatif dingin dan banyak membawa uap air dari Laut Cina Selatan akan mengakibatkan banyak curah hujan di Indonesia dan suhu permukaan laut menjadi relatif lebih rendah. Sebaliknya, Angin Muson Tenggara (*Southeast Monsoon*; Juni-September) yang mengalir dari daratan Australia yang relatif kering dan membawa sedikit uap air akan mengakibatkan musim kemarau di Indonesia khususnya bagian barat dan mengakibatkan suhu permukaan laut relatif lebih tinggi.

Fluktuasi suhu permukaan laut di Laut Jawa dan Selat Makassar memiliki pola yang relatif sama yaitu pola ganda minimum-maximum dalam setahun. Nilai-nilai tertinggi umumnya ditemui pada bulan Desember-Januari-Februari dan nilai SPL yang relatif tinggi (*second peak*) pada bulan Mei-Juni-Juli. Sedangkan nilai SPL minimum ditemui pada bulan September-Oktober-November dan SPL yang relatif rendah (*secondary low*) ditemui pada bulan Februari-Maret-April. Nilai maximum sebesar 30,3°C tercatat pada bulan Januari 1998 sedangkan nilai minimum sebesar 27,2°C tercatat pada bulan Maret 1998 (Gambar 2a). Hasil ini membuktikan bahwa pola fluktuasi SPL di Laut Jawa dan Selat Makassar selain dipengaruhi oleh Angin Muson juga dipengaruhi oleh sirkulasi massa air laut di daerah ini.



**Tabel 2.** Trend Suhu Permukaan Laut di Berbagai Lokasi Perairan Indonesia dalam Periode 18 Tahun Terakhir.

Lokasi	Wilayah Perairan	Slope
S-1	Perairan Barat Sumatra Utara	0,00004
S-2	Perairan Barat Sumatra Barat	0,00002
S-3	Lat Jawa	0,00004
S-4	Selat Makassar	0,00003
S-5	Perairan Sulawesi Utara	0,00003
S-6	Perairan Timor	0,00003
S-7	Perairan Biak	0,00003
S-8	Perairan Arafura	0,00008

Perairan Sulawesi Utara memiliki pola fluktuasi suhu yang relatif sama dengan perairan lainnya di Indonesia namun nilai SPL maximum dalam periode setahun ditemui bervariasi setiap tahunnya dan dapat ditemui pada bulan Juni-Desember sementara nilai SPL minimum ditemui pada bulan Maret-April. Sementara untuk perairan Timor, Biak, dan Arafura memiliki pola fluktuasi SPL yang relatif berbeda dengan pola fluktuasi SPL perairan lainnya di Indonesia dimana nilai SPL maximum ditemui pada bulan November-Desember-Januari dan nilai SPL minimum ditemui pada bulan Agustus-September. Nilai SPL yang relatif tinggi (secondary peak) pada tahun-tahun tertentu juga ditemui pada bulan April-Mei (Gambar 2b). Nilai SPL minimum pada ketiga lokasi ini sebesar 25,0°C (Laut Arafura, Agustus 1994) dan maximum sebesar 31,0°C (Laut Arafura, November 2000) (Gambar 2b). Relatif tingginya SPL di perairan Timor, Biak, dan Arafura pada periode musim barat (November-Januari) mungkin lebih dipengaruhi oleh posisi matahari yang lebih dekat pada perairan ini (berada pada bumi bagian selatan) sehingga membuat perairan ini menjadi relatif lebih panas.

### **Trend Konsentrasi Klorofil-a**

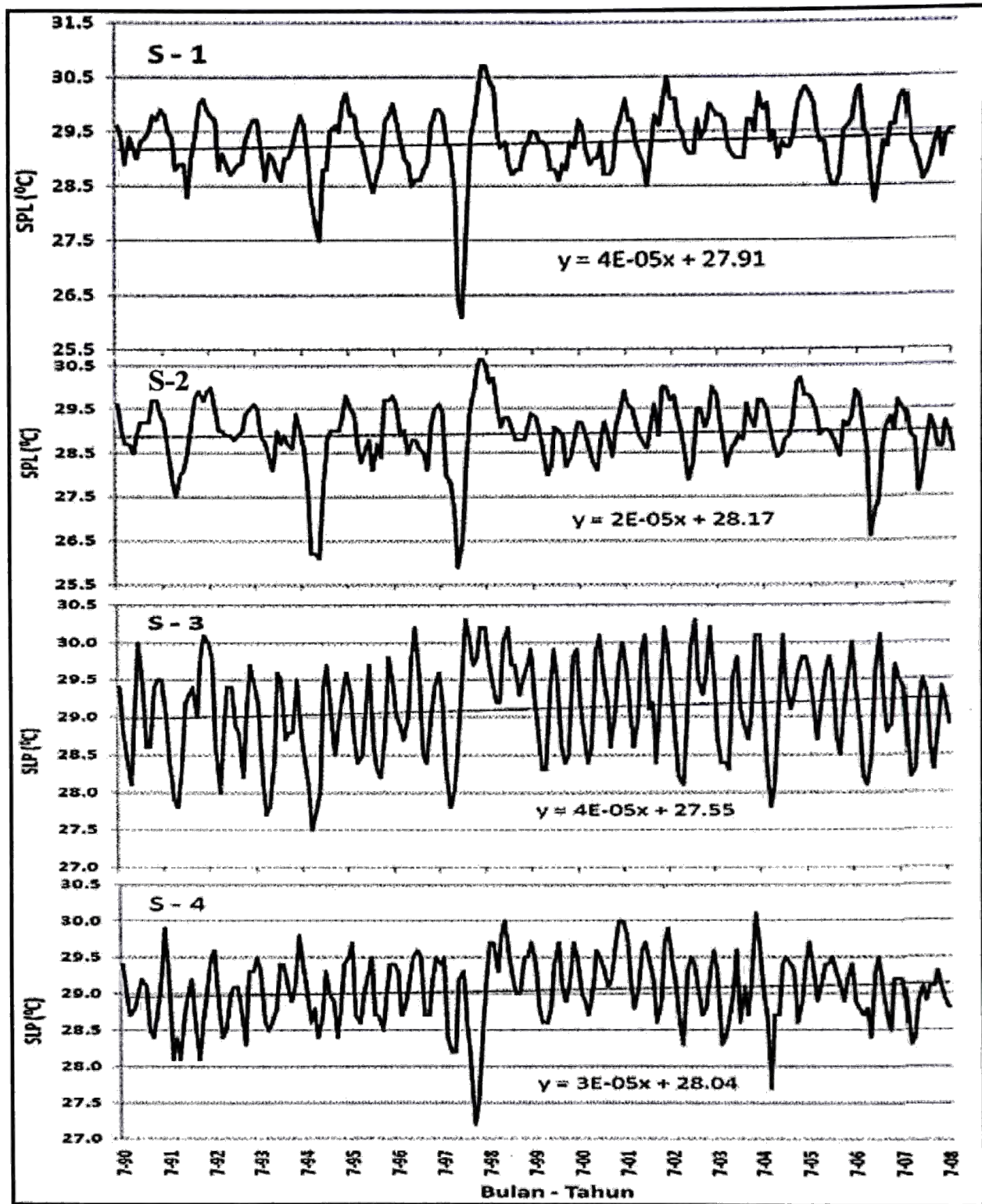
Trend konsentrasi klorofil-a untuk perairan Indonesia selama kurun waktu sekitar 11 tahun selengkapnya disajikan

dalam Tabel 3, Gambar 3a dan 3b. Dalam periode 11 tahun terakhir, data satelit SeaWiFS menunjukkan bahwa secara umum trend konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia cenderung menurun kecuali Laut Jawa dan Perairan Arafura.

Fluktuasi konsentrasi klorofil-a di perairan barat Sumatra Utara dan perairan barat Sumatra Barat memiliki pola yang sama yaitu nilai maximum tercatat pada periode September-Oktober-November-Desember dan minimum pada periode Maret-April-Mei-Juni-Juli-Agustus.

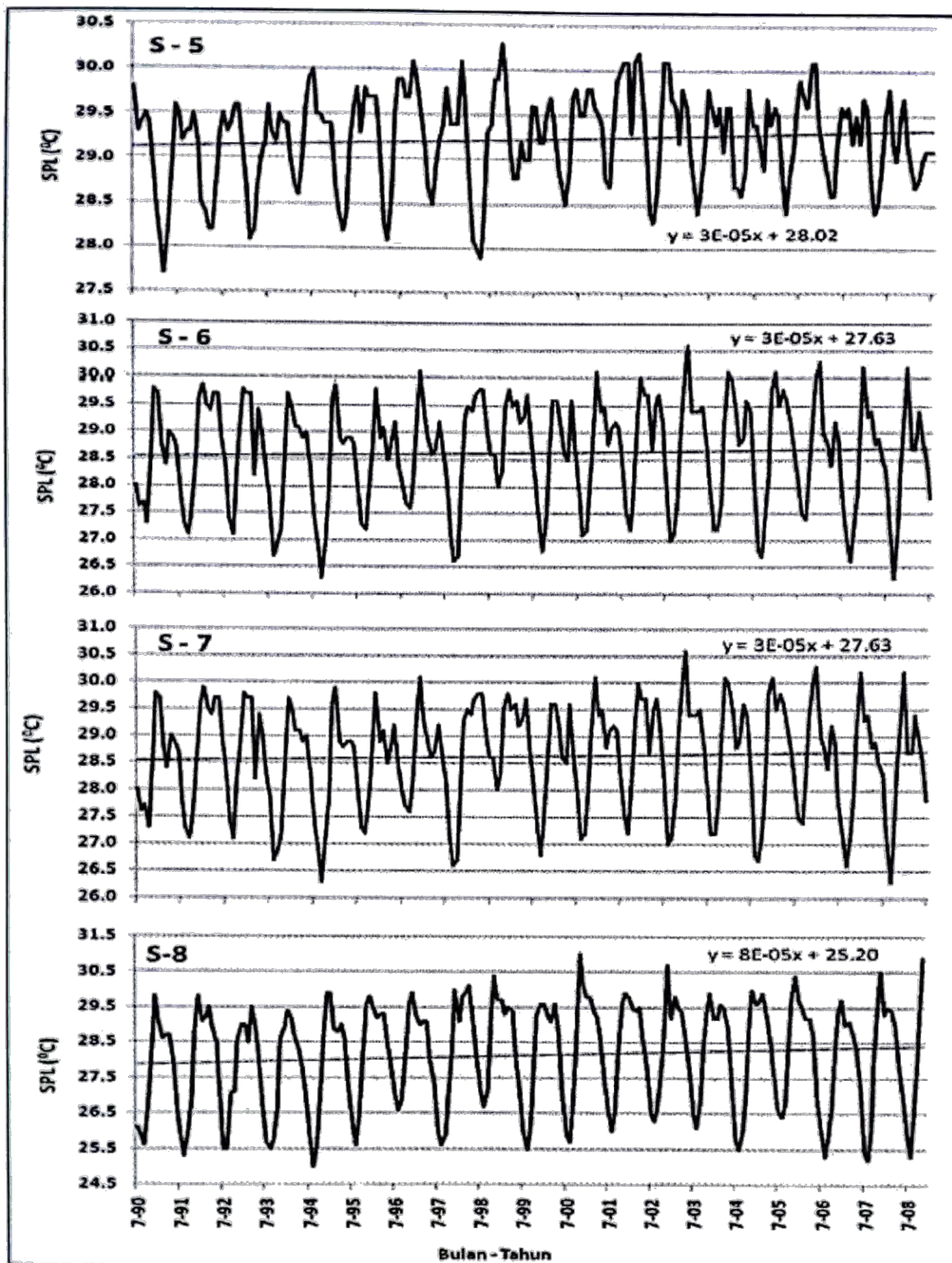
Nilai maximum sebesar 1,02 mg/m<sup>3</sup> (Desember 2007) dan minimum sebesar 0,14 mg/m<sup>3</sup> (Agustus 2005) (Gambar 3a). Konsentrasi klorofil-a di perairan barat Sumatra yang relatif tinggi pada periode September-Oktober disebabkan oleh upwelling yang terjadi di perairan ini akibat adanya angin tenggara yang kuat berasosiasi dengan kejadian *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Iskandar *et al.*, 2009). Sementara periode Maret-Agustus berasosiasi dengan Angin Muson Barat Laut yang mengakibatkan proses downwelling. Konsentrasi klorofil-a yang relatif tinggi seperti terjadi pada September-Desember 1997 dan September 2006 berkaitan dengan kejadian ENSO dan IOD (Nababan, 2009; Iskandar *et al.*, 2009; Saji *et al.*, 1999; Webster *et al.*, 1999).

Laut Jawa memiliki pola yang agak unik karena ditemukan dua nilai puncak dalam periode setahun yaitu periode Mei-Juni-Juli dan diikuti periode puncak kedua pada bulan Oktober-November-Desember. Sedangkan nilai minimum ditemukan pada periode Februari-Maret-April (Gambar 3a). Nilai maximum sebesar 1,04 mg/m<sup>3</sup> (Juni 2007) diduga berasosiasi dengan pengaruh sirkulasi massa air laut yang berasal dari selatan Selat Makassar dimana pada periode Juni-September proses upwelling terjadi di selatan Selat Makassar (Nababan *et al.*, 2009; Nontji, 2002). Konsentrasi klorofil-a yang relatif tinggi pada Oktober-Desember di perairan ini diduga berkaitan dengan curah hujan dan run-off sungai yang relatif tinggi.



Gambar 2a. Trend Suhu Permukaan Laut pada Perairan Barat Sumatra Utara (S-1), Perairan Barat Sumatra Barat (S-2), Laut Jawa (S-3), dan Selat Makassar (S-4).





Gambar 2b. Trend Suhu Permukaan Laut pada Perairan Sulawesi Utara (S-5), Perairan Timor (S-6), Perairan Biak (S-7), dan Perairan Arafura (S-8).

**Tabel 3.** Trend Konsentrasi Klorofil-a di Berbagai Lokasi Perairan Indonesia.

Lokasi Wilayah Perairan	Slope
S-1 Perairan Barat Sumatra Utara	-0,00003
S-2 Perairan Barat Sumatra Barat	-0,000006
S-3 Lat Jawa	+0,000001
S-4 Selat Makassar	-0,000001
S-5 Perairan Sulawesi Utara	-0,000009
S-6 Perairan Timor	-0,000001
S-7 Perairan Biak	-0,000003
S-8 Perairan Arafura	+0,000001

Perairan Selat Makassar dan Sulawesi Utara memiliki pola yang sama yaitu nilai maximum tercatat pada periode November-Desember-Januari-Februari dan minimum pada periode Mei-Juni-Juli-Agustus. Nilai maximum sebesar 1,96 mg/m<sup>3</sup> (Desember 2008) dan minimum sebesar 0,11 mg/m<sup>3</sup> (Mei 2006) (Gambar 3b).

Pola sebaliknya terjadi pada perairan Timor, Biak, dan Arafura yaitu nilai maximum tercatat pada bulan-bulan Juni-Juli-Agustus sedangkan minimum tercatat pada bulan-bulan Desember-Januari-Februari. Relatif tingginya konsentrasi klorofil-a di perairan ini berasosiasi dengan proses upwelling yang ditandai dengan relatif rendahnya SPL pada periode Juni-Juli-Agustus dan sebaliknya pada saat konsentrasi klorofil-a relatif rendah berasosiasi dengan proses downwelling yang ditandai dengan relatif tingginya SPL pada periode Desember-Januari-Februari. Nilai Maximum konsentrasi klorofil-a sebesar 0,85 mg/m<sup>3</sup> dan minimum sebesar 0,06 mg/m<sup>3</sup> (Januari 2001) (Gambar 3b).

**Dampak Perubahan SPL dan Konsentrasi Klorofil-a terhadap Penyerapan CO<sub>2</sub> di Perairan Indonesia**

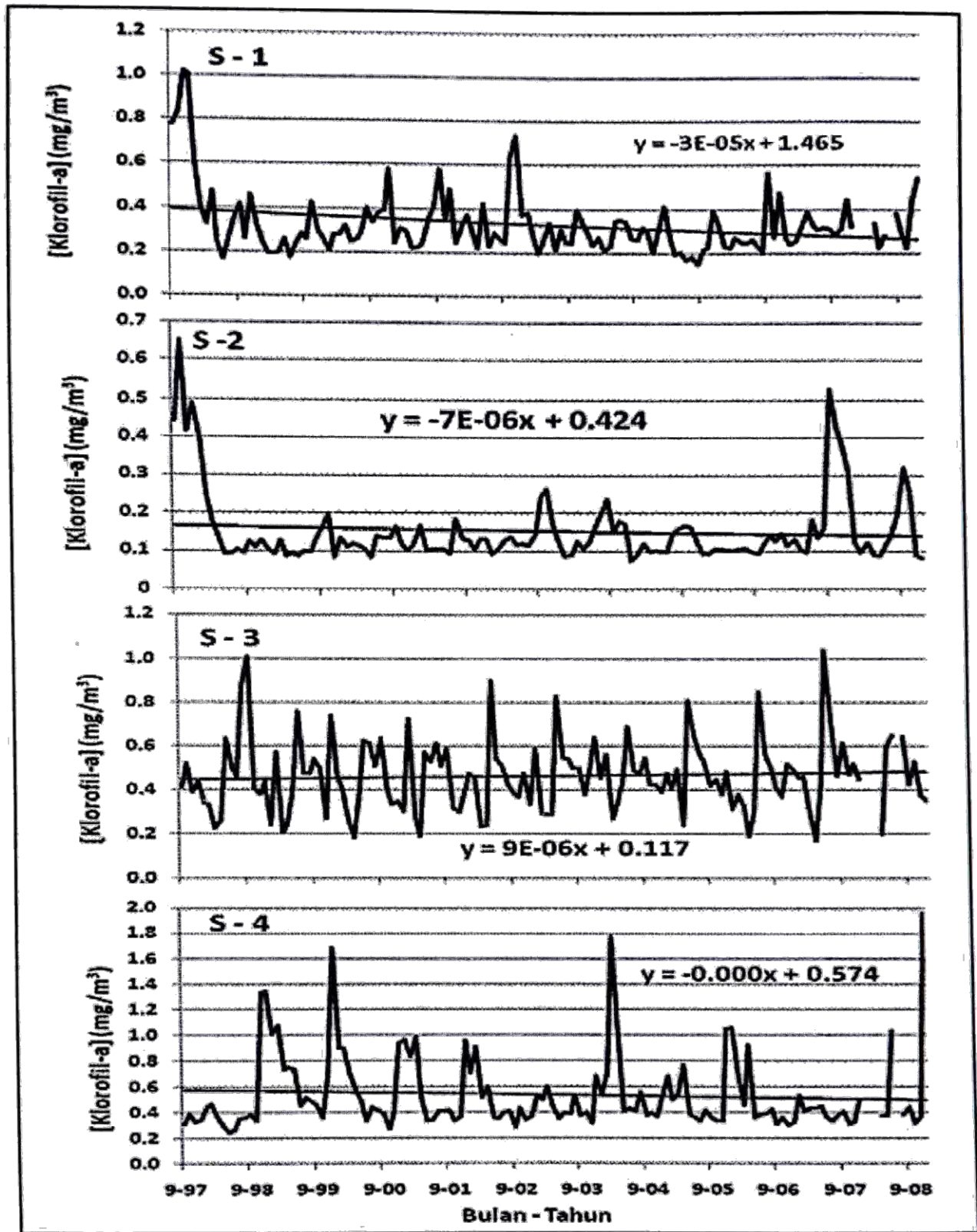
Suhu dan konsentrasi klorofil-a air laut memiliki peran yang sangat penting dalam proses penyerapan gas CO<sub>2</sub> dari udara

dan pelepasan gas CO<sub>2</sub> dari air laut itu sendiri. Meningkatnya suhu air laut akibat pemanasan global akan mengakibatkan kemampuan air laut untuk menyerap gas karbondioksida menjadi berkurang. Tingkat kelarutan gas CO<sub>2</sub> dalam air meningkat dua kali lebih besar pada air dingin dibandingkan dengan air hangat.

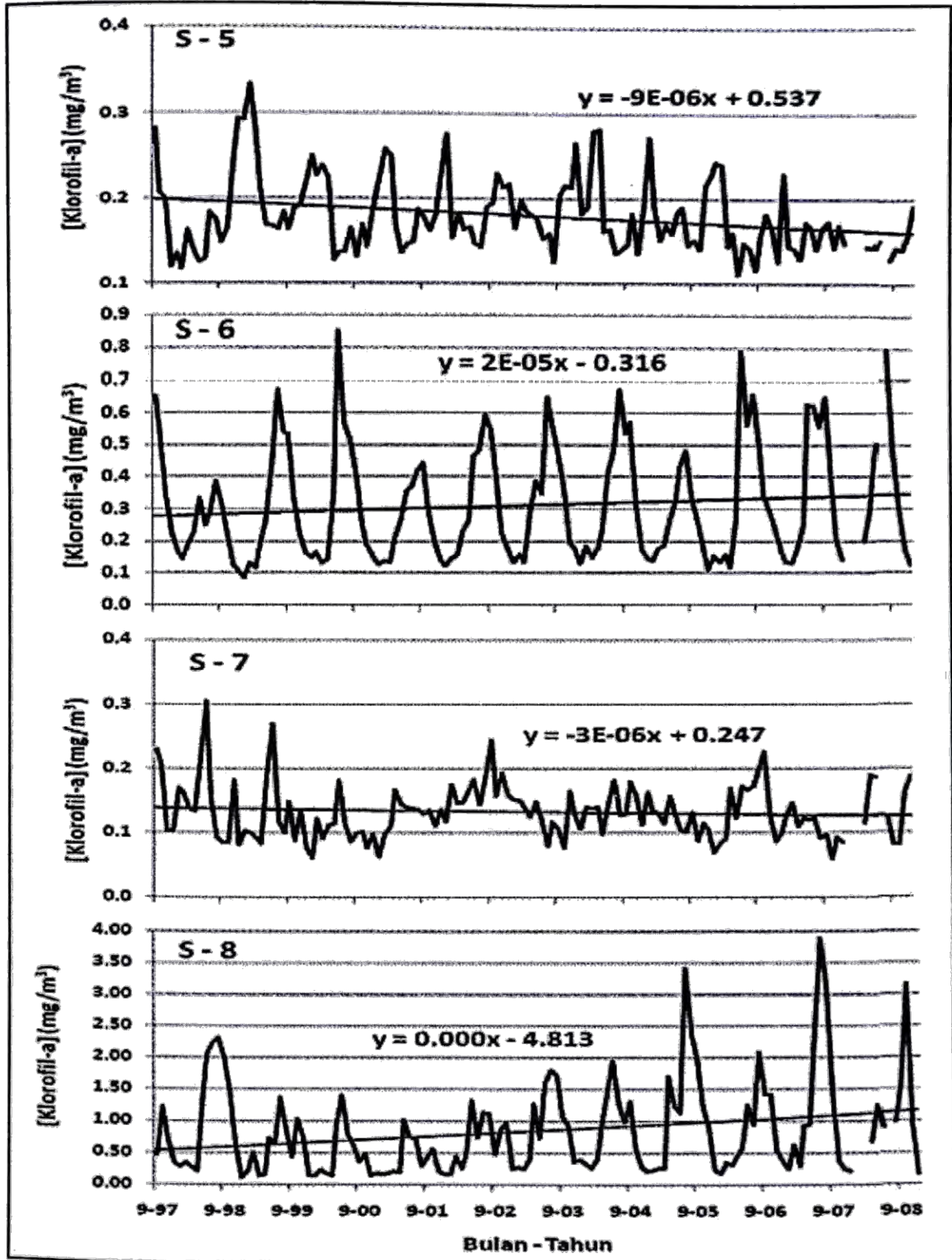
Dilain pihak, laju fotosintesis dan respirasi juga sangat tergantung pada suhu. Pada suhu yang relatif tinggi, laju fotosintesis dan laju respirasi sama-sama meningkat namun laju respirasi meningkat lebih cepat dibandingkan dengan laju fotosintesis sehingga pelepasan gas karbondioksida dapat menjadi lebih besar dibandingkan dengan penggunaannya dan dalam jangka panjang hal ini dapat menyebabkan laut menjadi *net carbon source*. Lefevre *et al.* (2004) melaporkan bahwa di Lautan Atlantik Utara tekanan parsial gas CO<sub>2</sub> dalam air laut telah meningkat lebih cepat dibandingkan dengan tekanan parsialnya di atmosfer khususnya pada saat musim panas yang mengakibatkan penurunan penyerapan gas karbondioksida dari atmosfer secara significant. Hal ini disebabkan karena meningkatnya laju respirasi di perairan ini tanpa diikuti oleh laju *uptake* CO<sub>2</sub> oleh fitoplankton secara significant.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa SPL berfluktuasi setiap tahunnya dengan kisaran suhu 25,0°C sampai 31,0°C dan nilai rata-rata sebesar 28,97°C. Trend SPL selama 18 tahun terakhir bernilai positif sekalipun masih dalam skala yang relatif kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa SPL di perairan Indonesia relatif panas dan cenderung meningkat dari tahun ke tahun. SPL yang relatif tinggi di perairan Indonesia dan trend SPL yang positif dari tahun ke tahun mengindikasikan bahwa tingkat pelarutan gas CO<sub>2</sub> di perairan Indonesia cenderung menurun dengan kata lain perairan Indonesia dapat berpotensi sebagai pelepas karbon (*carbon source*). Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian Koropitan (2009) yang menyimpulkan bahwa perairan





Gambar 3a. Trend Konsentrasi Klorofil-a pada Perairan Barat Sumatra Utara (S-1), Perairan Barat Sumatra Barat (S-2), Laut Jawa (S-3), dan Selat Makassar (S-4).



Gambar 3b. Trend Konsentrasi Klorofil-a pada Perairan Sulawesi Utara (S-5), Perairan Timor (S-6), Perairan Biak (S-7), dan Perairan Arafura (S-8).



Indonesia khususnya Laut Jawa merupakan pelepas karbon (*net carbon source*). Kondisi ini sesuai juga dengan hasil penelitian Takahashi *et al.* (2002) berdasarkan pengukuran  $p\text{CO}_2$  di lapangan dan pemodelan berdasarkan *solubility* dan *uptake* gas  $\text{CO}_2$  serta faktor angin pada perairan global dimana pada perairan tropis (minus perairan Indonesia) yang memiliki SPL relatif panas merupakan net flux gas  $\text{CO}_2$  yang positif atau penghasil gas  $\text{CO}_2$  (*carbon source*). Sedangkan perairan pada  $40^\circ\text{-}60^\circ$  Lintang Utara dan Selatan merupakan penyerap karbon utama (*major carbon sink*) karena di daerah ini bertemu arus laut yang mengarah ke kutub dan bercampur dengan massa air dingin dari *subpolar* yang kaya akan nutrient. Di daerah ini  $p\text{CO}_2$  massa air laut akan menurun akibat dampak pendinginan (*cooling effect*) oleh massa air subpolar serta dibantu oleh kecepatan angin yang relatif tinggi. Kondisi ini akan meningkatkan laju penyerapan gas  $\text{CO}_2$ .

Konsentrasi klorofil-a dapat digunakan sebagai ukuran massa fitoplanton dan tumbuhan mikroskopik ini mempunyai peranan penting dalam proses penyerapan karbon (*carbon uptake*) melalui proses fotosintesis. Semakin besar konsentrasi klorofil-a maka semakin besar potensinya untuk menyerap gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfer. Dengan demikian, perairan dengan populasi fitoplankton yang banyak akan bekerja efektif sebagai *carbon sink*. Sebaliknya, bila proses respirasi oleh semua komunitas mahluk hidup di kolom air laut melebihi proses fotosintesis, maka perairan tersebut berfungsi sebagai pelepas karbon (*carbon source*).

Hasil penelitian pada tahun 80-an dan 90-an telah membuktikan bahwa penambahan zat besi pada perairan yang memiliki kandungan nutrient cukup namun rendah konsentrasi klorofil-a (*HNLC-High Nutrient Low Chlorophyll*) akan meningkatkan populasi fitoplankton dan meningkatkan serapan gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfer secara nyata (Watson *et al.*, 2000; Watson, 1997; Lefevre & Watson, 1999). Akan tetapi hasil penelitian dari SOFeX (the Southern Ocean Iron Experiment) yang dilaksanakan mulai 2002 di perairan

antara New Zealand dan Antartika dengan menggunakan alat deteksi *carbon explorer* pada kedalaman 800 meter serta menguji hipotesis apakah penambahan zat besi ke perairan akan merubah iklim dunia memberikan bantahan terhadap hipotesis terdahulu bahwa hasil *blooming* fitoplankton akibat hasil penambahan zat besi tidak pernah sampai ke perairan dalam (*deep ocean*) (Bishop & Wood, 2009). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sekalipun terjadi *blooming* fitoplankton sebagai akibat penambahan zat besi namun tidak berpengaruh nyata terhadap absorpsi gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfer karena tidak terjadi presipitasi karbon ke laut yang lebih dalam secara nyata.

Konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia berfluktuasi setiap tahunnya tergantung pada musim dan sirkulasi massa air laut. Enam dari delapan lokasi ekstrak data konsentrasi klorofil-a dari satelit memperlihatkan trend yang negatif dan hanya dua lokasi yang menunjukkan trend positif (Laut Jawa dan perairan Arafura). Hal ini menunjukkan bahwa secara umum trend konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia cenderung negatif dalam kurun waktu 11 tahun terakhir. Kecenderungan menurunnya konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia ini akan mengakibatkan tingkat serapan gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfer menjadi menurun. Hasil ini sesuai dengan trend konsentrasi klorofil-a secara global khususnya di laut lepas subtropis (*mid-gyres ocean*) yang cenderung menurun dalam 10 tahun terakhir (Vantrepotte & Melin, 2009).

Perairan Indonesia banyak dipengaruhi oleh sungai-sungai yang dapat membawa nutrient dan bahan organik lainnya dari daratan. Hal ini akan meningkatkan kandungan bahan organik di perairan Indonesia yang pada akhirnya akan terlepas ke atmosfer setelah melalui proses daur ulang. Kecenderungan penurunan konsentrasi klorofil-a serta kecenderungan SPL yang meningkat akibat pemanasan global akan mengakibatkan penurunan tingkat kelarutan dan penyerapan (*uptake*) gas  $\text{CO}_2$  di perairan Indonesia sehingga perairan Indonesia lebih berpotensi

sebagai pelepas karbon (*net carbon source*) dibandingkan dengan fungsinya sebagai penyerap karbon (*net carbon sink*).

## Kesimpulan

Suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia berfluktuasi setiap tahun yang secara umum dipengaruhi oleh Angin Muson dan sirkulasi massa air laut. Kisaran SPL perairan Indonesia tercatat 25,0°C sampai 31,0°C dengan nilai rata-rata sebesar 28,97°C. Secara umum, trend SPL di perairan Indonesia selama 18 tahun terakhir bernilai positif atau cenderung meningkat dari tahun ke tahun. Sebaliknya, trend konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia selama 11 tahun terakhir secara umum menunjukkan nilai negatif kecuali di dua lokasi yaitu perairan Timor dan Arafura. SPL yang relatif tinggi dengan trend positif dapat meningkatkan tekanan parsial CO<sub>2</sub> di permukaan laut dan menurunkan laju pelarutan gas CO<sub>2</sub> dalam air laut sehingga mengakibatkan perairan Indonesia berpotensi sebagai pelepas karbon (*carbon source*). Trend negatif konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia juga mengindikasikan bahwa laju *uptake* gas CO<sub>2</sub> dari atmosfer cenderung menurun dari tahun-tahun sebelumnya. Disamping faktor SPL yang cenderung meningkat dan konsentrasi klorofil-a yang cenderung menurun, banyaknya sungai-sungai yang bermuara ke perairan Indonesia dapat memasok nutrisi dan bahan organik lainnya dalam jumlah besar sehingga perairan Indonesia berpotensi sebagai pelepas karbon (*net carbon source*).

## Daftar Pustaka

Bishop, J.K.B. & T.J. Wood. 2009. Year-round observations of carbon biomass and flux variability in the Southern Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB2019, doi:10.1029/2008GB003206.

Boden, T.A., D.P. Laiser, R.J. Sepanski, & F.W. Stoss. 1994. Trends '93. A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge

National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.

CNRS (Délégation Paris Michel-Ange). 2009. Ocean Less Effective at Absorbing Carbon Dioxide Emitted by Human Activity. *ScienceDaily*. Retrieved May 3, 2009, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/02/090216092937.htm>.

ESA (Ecological Society of America). 2009. Arctic has Potential to Alter Earth's Climate: Arctic Land and Seas Account for up to 25 Percent of World's Carbon Sink. *ScienceDaily*. <http://www.sciencedaily.com>. Retrieved, December 19, 2009.

Elkins, J.W., T.M. Thompson, J.H. Butler, R.C. Myers, A.D. Clarke, T.H. Swanson, D. J. Endres, A.M. Yoshinaga, R.C. Schnell, M. Winey, B.G. Mendoca, M.V. Losleben, N.B.A. Trivett, D.E.J. Worthy, V. Hudec, V. Chorney, P.J. Fraser, & L.W. Porter. 1994. Global and Hemispheric Means of CFC-11 and CFC-12 from the NOAA/CMDL Flask Sampling Program. Pp. 422-430. In: T.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski, & F.W. Stoss (Eds.), Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.

Houghton, R.A. 2007. Balancing the Global Carbon Budget. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35:313-347.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. An Introduction to Simple Climate Models Used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper II. 59pp.

Iskandar, I., S.A. Rao, & T. Tozuka. 2009. Chlorophyll-a Bloom along the Southern



- Coasts of Java and Sumatra during 2006. *International J. of Remote Sensing*, 30(3):663-671.
- Khalil, M.A.K., & R.A. Rasmussen. 1994. Global CH<sub>4</sub> Record Derived from Six Globally Distributed Locations. pp. 208-272. In: T. A. Boden, D. P. Kaiser, R. J. Sepanski, & F. W. Stoss (Eds.), Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Khatiwala, S., F. Primeau, & T. Hall. 2009. Reconstruction of the History of Anthropogenic CO<sub>2</sub> Concentrations in the Ocean. *Nature*, 462:346-349 (19 November 2009) | doi: 10.1038/nature08526.
- Keeling, C.D., & T.P. Whorf. 1994. Atmospheric CO<sub>2</sub> Records from Sited in the SIO Air Sampling Network. pp. 16-26. In: T. A. Boden, D. P. Kaiser, R. J. Sepanski, & F. W. Stoss (Eds.), Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Koropitan, A. 2009. Perdagangan Karbon: Posisi Tawar Laut Indonesia. Kompas, 30 November 2009.
- Lefevre, N., A. J. Watson, A. Olsen, A. F. Rios, F. F. Perez, and T. Johannessen. 2004. A decrease in the sink for atmospheric CO<sub>2</sub> in the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L07306, doi:10.1029/2003GL018957, 2004.
- Lefevre, N. & A.J. Watson. 1999. Modelling the Geochemical Cycle of Iron in the Oceans and its Impact on Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 13:727-736.
- Le Quéré, C., C. Rödenbeck, E.T. Buitenhuis, T.J. Conway, R. Langenfelds, A.G. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metz, N. Gillett, and M. Heimann. 2007. Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> Sink Due to Recent Climate Change. *Science*, DOI: 10.1126/Science.1136188.
- Li, X., W. Pichel, E. Maturi, P. Clemento-Colon, & J. Sapper. 2001. Deriving the Operational Nonlinear Multichannel Sea Surface Temperature Algorithm Coefficients for NOAA-15 AVHRR/3. *Int. J. Remote Sensing*, 22(4):699-704.
- Libes, S.M. 1992. An Introduction to Marine Biogeochemistry. John Wiley & Sons.
- Millero, F.J. 2006. Chemical Oceanography (3<sup>rd</sup> Edition). CRC Press/Taylor & Francis. 496p.
- Nababan, B. 2009. Unusual Upwelling Evidence along Eastern Part of Equator in Indian Ocean during 1997-1998 El Nino Event. *Jurnal Kelautan Nasional*, 4(1):16-31.
- Nababan, B., D. Zulkarnaen, & J.L. Gaol. 2009. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Sumbawa Berdasarkan Data Satelit SeaWiFS. *E-Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 1(2):72-83.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2010. 2009: Second Warmest Year on record; End of Warmest Decade. <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/temp-analysis-2009.html> (browsed on January 12, 2010)
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2008. Greenhouse Gases, Carbon Dioxide and Methane, Rise Sharply in 2007. *ScienceDaily*. <http://www.sciencedaily.com/2008/04/080423181652.htm>. Retrieved, December 19, 2009.
- Neftel, A.H., H. Friedly, E. Moor, H. Lotscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler, & B. Stauffer. 1994. Historical CO<sub>2</sub> Record from Siple Station Ice Core. Pp. 11-14. In: T.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski, & F.W. Stoss (Eds.), Trends '93: A Compendium of Data on Global



- Change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Nontji, A. 2002. Laut Nusantara. Penerbit Djambatan. Jakarta.
- O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garrar, M. Kahru, C. McClain. 1998. Ocean Color Chlorophyll Algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11):24,937-24,953.
- Park, J. 2009. A Re-evaluation of the Coherence between Global-average Atmospheric CO<sub>2</sub> and Temperatures at Interannual Time Scales. *Geophysical Research Letter*, 36(22):L22704 DOI: 10.1029/2009GL040975.
- Quadfasel, D.R., & G. Cresswell. 1992. A Note on the Seasonal Variability in the South Java Current. *Journal of Geophysical Research*, 97::3685-3688.
- Sabine, C.L., R.A. Feely, N. Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S. Wong, D.W. R. Wallace, B. Tilbrook, F.J. Millero, T. Peng, A. Kozyr, T. Ono, & A.F. Rios. 2004. The Ocean Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, 305:367-371.
- Saji, N.H., B.N. Groswani, P.N. Vinayachandran, & T. Yamagata. 1999. A Dipole Mode in the Tropical Indian Ocean. *Nature*, 401:360-363.
- Sprintall, J., J. Chong, F. Syamsuddin, W. Morawitz, S. Hautala, N. Bray, & S. Wijffels. 1999. Dynamics of the South Java Current in the Indo-Australian Basin. *Geophysical Research Letters*, 26:2493-2496.
- Solomon, S.Q.D., M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (Eds.). 2007. Climate Change 2007-the Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Takahashi, T., S.C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R.A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, & Y. Nojiri. 2002. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 49(9-10):1601-1622.
- Titus, J.G. & U.K. Narayanan. 1995. The Probability of Sea Level Change. EPA. 230-R-95-008.
- Vantrepotte, V. & F. Mélin. 2009. Temporal variability of 10-year global SeaWiFS time-series of phytoplankton chlorophyll-a concentration. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, doi:10.1093/icesjms/fsp107.
- Walton, C.C. 1988. Nonlinear Multichannel Algorithms for Estimating Sea Surface Temperature with AVHRR Satellite Data. *J. Appl. Meteorol.*, 27:115-126
- Watson, A.J., D.C.E. Bakker, A.J. Ridgwell, P.W. Boyd & C.S. Law. 2000. Effect of iron supply on Southern Ocean CO<sub>2</sub> uptake and implications for glacial atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, Vol. 407. 12 OCTOBER 2000 |www.nature.com
- Watson, A.J. 1997. Volcanic Iron, CO<sub>2</sub>, Ocean Productivity and Climate. *Nature*. Vol. 385. 13 February 1997/www.nature.com.
- Webster, P.J., A.M. Moore, J.P. Loschnigg, & R.R. Leben. 1999. Coupled Ocean-Atmosphere Dynamics in the Indian Ocean during 1997-1998. *Nature*, 401:356-360.
- Wyrtki, K. 1961. Physical Oceanography of the Southeast Asian Water. Naga Report. Vol. 2. La Jolla, California.