

PENGARUH DURASI DAN INTENSITAS *UPWELLING* BERDASARKAN ANOMALI SUHU PERMUKAAN LAUT TERHADAP VARIABILITAS PRODUKTIVITAS PRIMER DI PERAIRAN INDONESIA

INFLUENCES OF UPWELLING DURATION AND INTENSITY BASED ON SEA SURFACE TEMPERATURE ANOMALY TOWARD PRIMARY PRODUCTIVITY VARIABILITY IN INDONESIAN WATERS

Putri Kemili dan Mutiara R. Putri

Kelompok Keahlian Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, ITB
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132; e-mail: mili129pu@gmail.com

ABSTRACT

The existence of upwelling generally increases waters productivity. However, the influence of upwelling could be different based on location and time. The difference of upwelling duration and intensity (strength) can affect the variability of primary productivity in Indonesian waters. The estimation of primary productivity during the period of January 2000 to December 2007 was conducted using Carbon-based Production Model (CbPM). Sea Surface Temperatures (SST) Anomaly data on the same period was used as parameter to determine the upwelling conditions. The study locations were west coast of Sumatra, south waters of East Java to East Nusa Tenggara, Banda Sea, Gulf of Bone, Maluku Sea and Halmahera Sea. The results showed that in the south of East Java and Banda Sea have upwelling with longer duration (3–4 months) and higher intensity (decrease in temperature reached $>2^{\circ}\text{C}$ below average), the primary productivity was higher than other locations. Halmahera Sea showed the existence of upwelling only at certain time when El Niño occurred, while Gulf of Bone and Maluku Sea showed the occurrence of upwelling during southeast season only with 2–3 months of duration and vary intensity, which shown with the decrease in temperature ranging from $0,5\text{--}1,8^{\circ}\text{C}$ below average. El-Niño and dipole mode in Indonesia waters generally caused longer duration and stronger intensity of upwelling producing more productivity than normal years.

Keywords: *upwelling, primary productivity, carbon-based production model*

ABSTRAK

Adanya proses *upwelling* disuatu perairan umumnya akan meningkatkan produktivitas perairan. Namun besar pengaruh dari *upwelling* ini dapat berbeda berdasar tempat dan waktu. Adanya perbedaan durasi (lama kejadian) dan intensitas (kekuatan) dari *upwelling* dapat mempengaruhi variabilitas produktivitas primer wilayah perairan Indonesia. Estimasi produktivitas primer pada periode Januari 2000 sampai Desember 2007 dilakukan menggunakan *Carbon-based Production Model* (CbPM). Data *Sea Surface Temperature* (SST) *Anomaly* pada periode yang sama digunakan sebagai indikator untuk menentukan kondisi *upwelling*. Lokasi yang dianalisis antara lain perairan barat Sumatera, perairan selatan Jawa Timur sampai Nusa Tenggara Timur, Laut Banda, Teluk Bone, Laut Maluku, dan Laut Halmahera. Hasil menunjukkan bahwa selatan Jawa Timur dan Laut Banda yang memiliki durasi lebih panjang (3–4 bulan) dan intensitas lebih tinggi (anomali SST mencapai $>2^{\circ}\text{C}$ di bawah rata-rata), menghasilkan produktivitas primer yang paling tinggi dibandingkan lokasi lainnya. Laut Halmahera memperlihatkan adanya *upwelling* hanya pada waktu tertentu seperti saat terjadinya El-Niño, sedangkan Teluk Bone dan Laut Maluku memperlihatkan terjadinya *upwelling* setiap musim timur dengan durasi hanya 2–3 bulan dan intensitas *upwelling* yang bervariasi, ditunjukkan dengan penurunan temperatur berkisar $0,5\text{--}1,8^{\circ}\text{C}$ di bawah rata-rata. Adanya fenomena El-Niño dan *dipole mode* positif yang terjadi di perairan Indonesia umumnya menyebabkan durasi *upwelling* yang lebih lama dan intensitas *upwelling* meningkat sehingga menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun normal.

Kata kunci: *upwelling, produktivitas primer, carbon-based production model*

I. PENDAHULUAN

Tingkat produktivitas primer suatu perairan umumnya berhubungan dengan tingkat kelimpahan sumber daya suatu perairan, dimana produktivitas primer sebagai laju fotosintesis dapat dinyatakan sebagai jumlah gram karbon yang dihasilkan dalam satu meter kuadrat kolom air per hari (gCm^{-2} per hari). *Net primary productivity* (NPP) atau Produktivitas primer bersih juga menyatakan karbon yang tersedia untuk tingkat trofik yang lebih tinggi (Levinton, 2009), seperti zooplankton dan nekton. Dapat dikatakan pada wilayah dengan produktivitas primer yang tinggi maka akan menghasilkan sumber daya laut yang tinggi, seperti perikanan atau pun keindahan bawah laut yang dapat dijadikan aset pariwisata bahari.

Perairan Indonesia yang luas memiliki potensi sumber daya laut yang besar namun tidak merata pada seluruh wilayahnya. Beberapa wilayah perairan memiliki sumber daya alam yang melimpah namun sebagian lagi tidak demikian. Hal ini disebabkan perbedaan tingkat kesuburan perairan yang dapat diidentifikasi berdasarkan tingkat produktivitas primernya. Tingkat produktivitas suatu perairan dipengaruhi oleh berbagai faktor, tiga faktor utama adalah ketersediaan nutrisi, cahaya dan temperatur. Nutrien dibutuhkan oleh fitoplankton untuk tumbuh dan berkembang biak, cahaya dibutuhkan oleh fitoplankton untuk dapat melakukan proses fotosintesis, sedangkan temperatur mempengaruhi laju fotosintesis dan distribusi fitoplankton di suatu kolom perairan. Fitoplankton sendiri merupakan produsen utama di perairan laut yang berperan dalam menghasilkan produktivitas primer.

Kandungan nutrisi yang tinggi umumnya ditemukan di lapisan dalam dengan tingkat pencahayaan yang rendah,

untuk itu diperlukan suatu proses tertentu untuk menjamin ketersediaan nutrisi di lapisan permukaan. Salah satunya adalah proses *upwelling*, yang merupakan istilah untuk menyatakan proses naiknya massa air dari bawah ke permukaan laut, dimana dari kajian-kajian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa daerah *upwelling* merupakan daerah lepas pantai paling produktif (Nontji, 1993). Wilayah *upwelling* umumnya ditandai oleh kandungan nutrisi yang tinggi dan temperatur permukaan yang lebih rendah dari sekitarnya.

Berbagai penelitian tentang *upwelling* sudah banyak dilakukan di Indonesia (Wyrki, 1961; Nontji, 1993; Gordon and Susanto, 2001; Susanto *et al.*, 2004; Siswanto and Suratno, 2008), sehingga di beberapa wilayah perairan sudah dapat dibuktikan dan diketahui dengan pasti adanya proses *upwelling*. Namun di beberapa daerah lain adanya proses *upwelling* masih merupakan dugaan. Dalam penelitian kali ini akan dikaji enam lokasi perairan, dimana tiga diantaranya merupakan wilayah yang telah diketahui dengan pasti adanya *upwelling* dan tiga diantaranya merupakan wilayah yang masih diduga adanya *upwelling* (Gambar 1).

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji bagaimana intensitas (kekuatan) dan lama kejadian (durasi) *upwelling* mempengaruhi tingkat produktivitas primer di beberapa perairan di Indonesia. Durasi *upwelling* mengacu pada lama waktu kejadian *upwelling* di suatu wilayah perairan. Sedangkan Intensitas *upwelling* mengacu pada tingkat penurunan temperatur permukaan oleh proses fisis dan dinamis perairan, yang dapat diperkuat/diperlemah oleh fenomena-fenomena seperti El Niño/La Niña-Southern Oscillation (ENSO) di Samudera Pasifik dan *dipole mode* (DM) di Samudera Hindia.

Tingkat produktivitas primer di perairan Indonesia diestimasi menggunakan *Carbon-based Production Model* (CbPM), yang berbasis pada karbon fitoplankton (Behrenfeld, 2005), sedangkan SST atau temperatur permukaan laut (SeaWiFS) dilihat sebagai parameter untuk menentukan kondisi kekuatan *upwelling*-nya.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Enam lokasi yang akan dikaji pada penelitian ini dapat dilihat dari Gambar 1. Lokasi 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah perairan barat Sumatera, selatan Jawa Timur sampai Nusa Tenggara Timur (NTT), dan Laut Banda yang merupakan wilayah diketahui terjadinya *upwelling*. Lokasi 4, 5, dan 6 berturut-turut adalah perairan Teluk Bone, Laut Maluku dan Laut Halmahera yang masih merupakan wilayah yang diduga terjadinya *upwelling*.

2.2. Data

Data yang digunakan sebagai input model untuk menghitung produktivitas primer bersih (NPP) adalah *Sea Surface Chlorophyll* (SSC), *photosynthetically active radiation* (PAR), *particulate backscattering coefficients* (Bbp), *attenuation coefficients* (K_{490}) yang diperoleh dari citra satelit SeaWiFS, dan *mixed layer depth* (MLD) yang didapatkan dari *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC) untuk periode Januari 2000 sampai Desember 2007. Data *Sea Surface Temperature* (SST) dari SeaWiFS pada periode yang sama digunakan sebagai

parameter untuk menentukan kondisi *upwelling*.

Data-data tersebut didapatkan dari <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/> dengan resolusi $0,18^\circ$ lintang x $0,18^\circ$ bujur, kecuali K_{490} dengan resolusi $0,09^\circ$ lintang x $0,09^\circ$ bujur yang didapat dari <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>. Kemudian semua data diinterpolasi untuk wilayah $6^\circ\text{LU} - 11^\circ\text{LS}$ dan $95^\circ\text{BT} - 141^\circ\text{BT}$ menjadi $0,07^\circ$ lintang x $0,07^\circ$ bujur.

2.3. Metode *Carbon-based Production Model* (CbPM)

Nilai *Net primary productivity* (NPP) diestimasi dengan menggunakan persamaan CbPM berdasarkan Behrenfeld *et al.*, (2005) yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$NPP = \frac{C_{sat} \times \left[2 \text{ cell divisions } d^{-1} \times \frac{Chl:C_{sat}}{0,022 + (0,045 - 0,022) e^{-3I_g}} \times (1 - e^{-3I_g}) \right] \times Z_{eu} \times \frac{0,66125I_0}{I_0 + 4,1}}$$

Dimana:

NPP : Produktivitas primer bersih harian ($\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

C_{sat} : Biomassa karbon fitoplankton permukaan (mg C m^{-3})

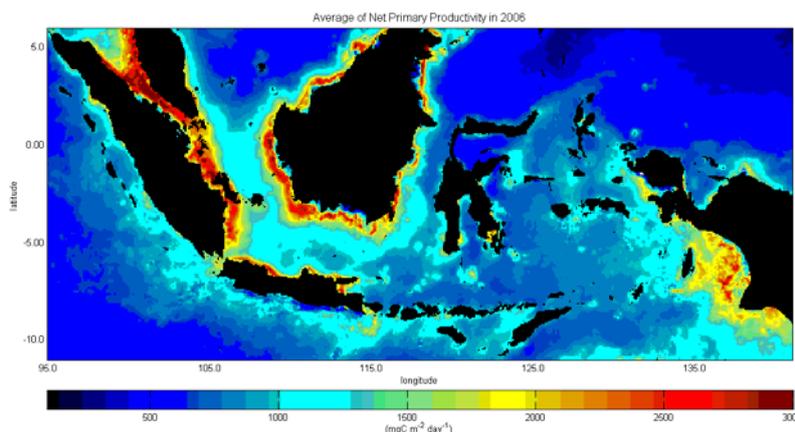
Chl : Konsentrasi klorofil-a di permukaan (mg Chl m^{-3})

μ_{max} : laju pertumbuhan potensial maksimum (d^{-1})

I_g : Tingkat cahaya pada *mix layer depth* (W m^{-2})

Z_{eu} : Kedalaman fotosintesis aktif (m)

I_0 : Radiasi matahari untuk fotosintesis (PAR)(W m^{-2}).



Gambar 1. Wilayah kajian.

C_{sat} didapatkan dari Bbp (443) (m^{-1}) yang dikoreksi untuk distribusi 'background' stabil dari partikel non alga ($0,00035 m^{-1}$), dan dikalikan suatu faktor skala ($13.000 mgCm^{-2}$) sehingga didapatkan C_{sat} antara 25-40% dari total *particulate organic carbon* (POC) (Behrenfeld *et al.*, 2005). Data Bbp digunakan untuk memperkirakan karbon fitoplankton sebagai pengukuran biomassa fitoplankton.

$$C_{sat} = [B_{bp}(443) - 0,00035] \times 13.000$$

Tingkat cahaya *mix layer* bulanan (I_g) didapatkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_g = \frac{I_0}{H_{irr}} e^{-K_{490} \times (MLD/2)}$$

Dimana H_{irr} adalah durasi cahaya perhari, karena tergantung pada posisi lintang geografis perairan maka untuk perairan tropis digunakan $H_{irr} = 12$ jam. Z_{eu} adalah kedalaman dimana fotosintesis aktif terjadi, dan dihitung sesuai persamaan Morel dan Berthon (1989) berikut (Suciaty dan Radjawanne, 2008):

$$Z_{eu} = 68,89 \times Chl^{-0,125}, \text{ jika } Chl < 0,0435$$

$$Z_{eu} = 37,67 \times Chl^{-0,317}, \text{ jika } 0,0435 \leq Chl \leq 1$$

$$Z_{eu} = 36,12 \times Chl^{-0,378}, \text{ jika } Chl > 1$$

2.4. Analisis Data

Hasil perhitungan *Net primary productivity* (NPP) yang didapatkan dengan metode CbPM kemudian dirata-ratakan untuk tiap wilayah kajian dan digambarkan bersamaan dengan rata-rata SST tiap wilayah untuk melihat bagaimana pengaruh kondisi *upwelling* (durasi dan intensitas) mempengaruhi tingkat produktivitas primer di lokasi yang ditinjau. Kejadian *upwelling* di lihat dari tingkat penurunan SST, yaitu *upwelling* dikatakan terjadi jika anomali SST $\geq 0.5^\circ$

C dibawah suhu rata-rata dan terjadi peningkatan NPP rata-rata. Nilai $0.5^\circ C$ ini umumnya digunakan dalam Oceanic Nino Index (ONI), yaitu indeks untuk melihat kejadian ENSO. Tentu saja indeks yang diambil dalam penelitian ini bukanlah ONI, penentuan nilai ini bertujuan untuk mempermudah pengamatan data dalam menentukan kondisi *upwelling*.

Dari data-data dan definisi di atas, maka durasi *upwelling* langsung dapat diestimasi dengan melihat lamanya kondisi *upwelling* teridentifikasi.

Sedangkan Intensitas (kekuatan) *upwelling* dikatakan meningkat jika penurunan suhu yang terjadi semakin tinggi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan Produktivitas Primer dengan CbPM Dikaitkan dengan Durasi dan Intensitas *Upwelling*

Rata-rata *Net primary productivity* (NPP) atau produktivitas primer bersih perairan Indonesia dari tahun 2000–2007 berkisar 640–1070 mgCm⁻² per hari (Kemili, 2011), dengan rata-rata harian tiap bulannya dapat dilihat pada Tabel 1. Dapat dilihat juga rata-rata produktivitas primer di perairan Indonesia tiap tahunnya meningkat pada bulan Juni sampai September (740–1070 mgCm⁻² per hari). Hal ini berkaitan dengan terjadinya proses *upwelling* di beberapa wilayah perairan Indonesia, selama musim timur-tenggara.

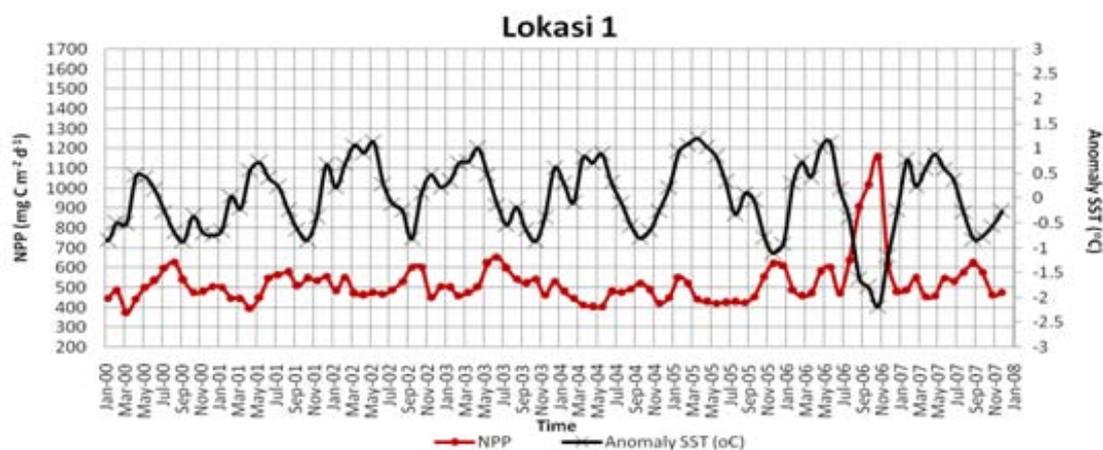
Nilai NPP di Perairan barat Sumatera (Gambar 2) pada kondisi normal

berkisar 400–500 mgCm⁻² per hari, sedangkan rata-rata SST nya adalah 28,66°C. Penurunan SST yang mencapai 0,8°C dari rata-rata SST umumnya hanya meningkatkan NPP sekitar 100–250 mgCm⁻² per hari, dengan durasi sekitar 2 sampai 3 bulan. Penurunan SST dan peningkatan NPP ini terjadi pada waktu yang tidak selalu sama ditiap tahunnya, berkisar bulan Juli sampai September (Gambar 2).

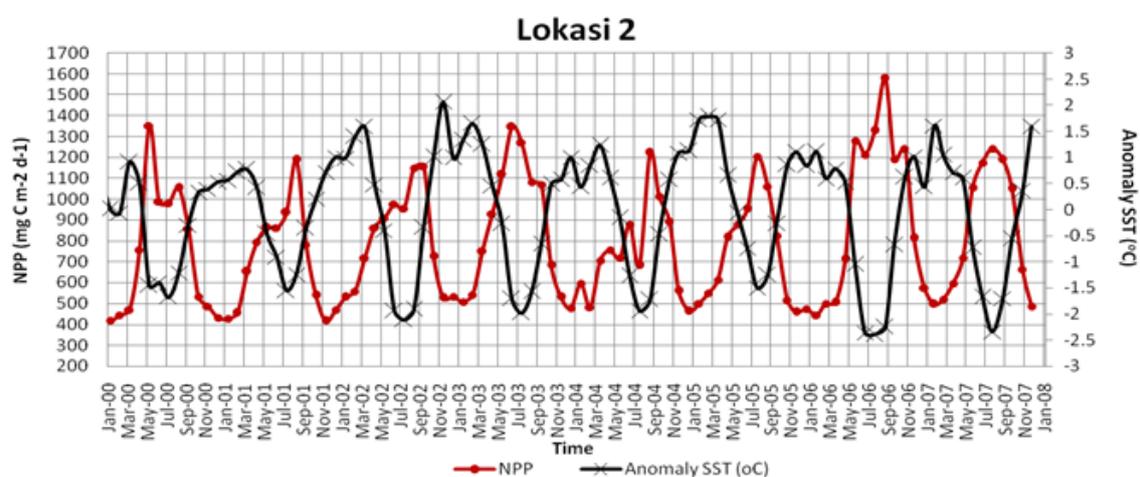
Hasil yang di dapat juga menunjukkan bahwa pada Juli-Desember 2006 (Gambar 2) penurunan SST >1,1°C atau mencapai -2,2°C dari rata-rata SST diikuti dengan peningkatan NPP sekitar 200–700 mgCm⁻² per hari. Durasi *upwelling* pada tahun ini mencapai 4 bulan dan intensitas *upwelling* pun lebih besar terlihat dari SST permukaan yang jauh lebih rendah dari biasanya. Peningkatan durasi dan intensitas *upwelling* ini dapat dikaitkan dengan terjadinya kondisi *dipole mode* positif yang mempengaruhi kondisi perairan di sekitar barat Sumatera.

Tabel 1. Nilai produktivitas primer rata-rata harian hasil perhitungan CbPM (Sumber: Kemili, 2011).

Bulan	Rata-rata produktivitas (mg cm ⁻² d ⁻¹) di Indonesia								Rata-rata
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
Januari	711.86	663.30	739.71	755.52	758.84	732.99	797.09	824.19	747.94
Februari	716.03	664.56	744.37	753.21	777.71	767.15	786.66	841.99	756.46
Maret	704.19	705.22	736.55	750.76	747.94	780.01	796.75	825.75	755.90
April	643.74	702.49	721.24	720.83	718.26	734.10	749.93	752.64	717.90
Mei	695.66	733.72	760.32	762.97	705.13	758.01	773.42	800.55	748.72
Juni	740.80	740.29	781.35	810.73	662.32	841.16	869.77	831.78	784.78
Juli	780.45	798.55	816.21	873.07	800.80	882.08	935.27	903.34	848.72
Agustus	825.10	821.52	867.19	894.94	830.23	960.78	1030.44	954.01	898.03
September	856.65	872.29	923.00	893.66	891.52	900.59	1066.32	984.90	923.62
Oktober	733.48	765.00	910.81	827.17	861.36	801.87	993.07	879.37	846.52
November	669.12	724.26	804.00	758.70	778.30	742.56	900.73	754.64	766.54
Desember	688.40	712.04	718.61	798.27	725.83	737.30	823.54	742.09	743.26



Gambar 2. Rata-rata produktivitas primer bersih (NPP) dan anomali temperatur permukaan laut (SST) di perairan Barat Sumatera.



Gambar 3. Rata-rata produktivitas primer bersih (NPP) dan anomali temperatur permukaan laut (sst) di perairan Selatan Jawa sampai Nusa Tenggara Timur.

Di sepanjang pantai selatan Jawa Timur, Bali sampai Nusa Tenggara Timur (lokasi 2 Gambar 1) pada bulan Oktober-Februari nilai NPP berkisar 400–600 mgCm^{-2} per hari, dengan rata-rata SST selama tahun pengamatan adalah $27,52^{\circ}\text{C}$. SST mulai mengalami penurunan pada bulan Maret dan meningkat kembali pada bulan September. Pada bulan Maret sampai Mei walaupun SST berkurang, namun SST perairan masih di atas SST rata-rata dengan peningkatan NPP berkisar 300–400 mgCm^{-2} per hari. Memasuki bulan Juni sampai Agustus terlihat penurunan SST terus terjadi

sehingga mencapai $>1,4^{\circ}\text{C}$ dibawah rata-rata SST yang diikuti dengan peningkatan NPP mencapai 300-800 mgCm^{-2} per hari (Gambar 3).

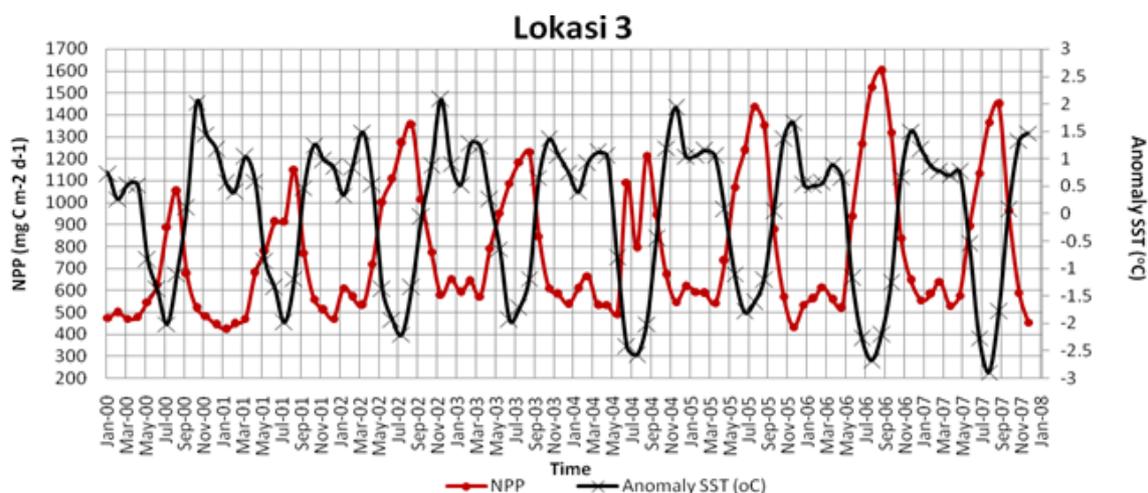
Tingginya produktivitas primer di selatan Jawa ini terjadi karena adanya proses *upwelling* di pantai selatan Jawa dan sepanjang pantai selatan Bali sampai Nusa Tenggara pada saat musim timur. Angin dari timur ini menyebabkan timbulnya kekosongan massa di sepanjang perairan tersebut yang kemudian digantikan oleh massa air dari laut dalam yang membawa kandungan nutrisi yang lebih tinggi. Dengan melihat penurunan

SST dan peningkatan NPP yang terjadi dapat diketahui *upwelling* yang terjadi tiap tahunnya berdurasi 3-4 bulan (Gambar 3). Pada tahun-tahun El-Niño durasi dan intensitas *upwelling* tidak terlihat mengalami perubahan drastis, kecuali pada tahun 2006 dimana tidak hanya terjadi El-Niño namun juga dipole mode positif. Terjadi peningkatan intensitas dimana penurunan SST mencapai 2,2°C dibawah rata-rata SST dan peningkatan rata-rata NPP mencapai 900 mgCm⁻² per hari.

Di Laut Banda (Lokasi 3 Gambar 1) NPP tinggi umumnya terjadi pada bulan Juni sampai September dengan peningkatan 200–1000 mgCm⁻² per hari dibandingkan dengan bulan-bulan lain dimana nilai NPP nya berkisar 400–700 mgCm⁻² per hari. Peningkatan NPP ini terjadi bersamaan dengan penurunan SST mencapai 1,8–2,9°C dibawah rata-rata SST Laut Banda selama tahun pengamatan (27,79°C). Pengaruh ENSO cukup terlihat pada produktivitas perairan Laut Banda, pada tahun 2000 dimana terjadi fenomena La-Niña, rata-rata NPP maksimum hanya 1051 mgCm⁻² per hari, pada tahun normal seperti tahun 2001 dan 2003 rata-rata NPP maksimum mencapai

1250 mgCm⁻² per hari, dan pada tahun El-Niño seperti tahun 2002, 2004 dan 2006 rata-rata NPP maksimum mencapai 1600 mgCm⁻² per hari (Gambar 3).

NPP yang meningkat pada bulan Juni sampai September (Gambar 3) disebabkan oleh terjadinya proses *upwelling* pada saat musim timur seperti yang telah dijelaskan dalam Wyrki (1961). Saat angin musim timur berhembus, massa air dari Laut Banda di bawa keluar dalam jumlah yang besar sehingga terjadi kekosongan massa, kekosongan massa ini kemudian diisi oleh air dari lapisan dalam yang membawa nutrien ke lapisan permukaan. Hal ini juga dijelaskan oleh Gordon and Susanto (2001) yang melaporkan bahwa ketika musim timur arus bergerak ke Samudera Hindia membawa massa air sehingga terjadi *upwelling* untuk menggantikan massa air yang mengalir ke Samudera Hindia tersebut, dimana *upwelling* mencapai maksimum pada bulan Mei dan Juni dan akan didistribusikan dengan bantuan angin maksimum pada bulan Agustus. Pada waktu yang hampir bersamaan produktivitas di sekitar perairan selatan Sulawesi Tenggara juga meningkat.

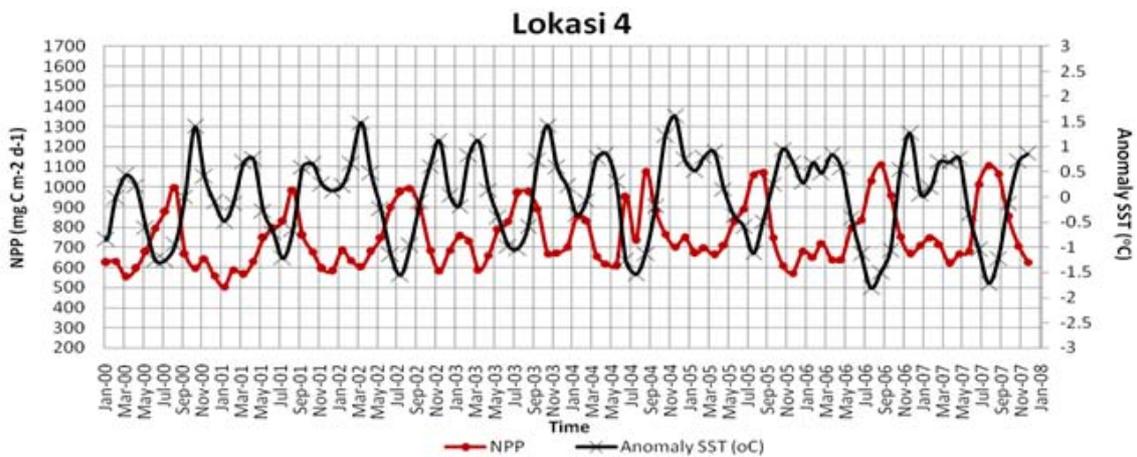


Gambar 4. Rata-rata produktivitas primer bersih (NPP) dan anomali temperatur permukaan laut (SST) di perairan Laut Banda.

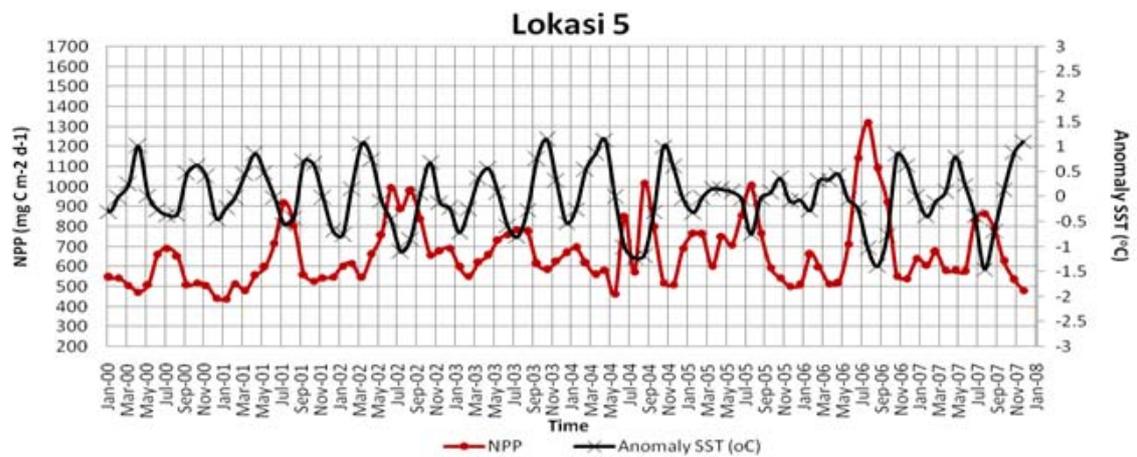
Pada perairan selatan Sulawesi Tenggara atau sekitar Teluk Bone yang ditunjukkan oleh lokasi 4 pada Gambar 1, kondisi yang menunjukkan terjadinya *upwelling* terlihat sepanjang bulan Juni sampai September (Gambar 5). Pada bulan-bulan lain umumnya nilai rata-rata NPP berkisar 500-700 mgCm⁻² per hari. Sedangkan pada kondisi *upwelling* terjadi penurunan SST mencapai 1-1,82°C dibawah SST rata-rata selama tahun pengamatan (28,40°C) dan peningkatan NPP mencapai 300-400 mgCm⁻² per hari. Disini pengaruh ENSO tidak terlalu kuat namun masih dapat terlihat seperti pada

tahun 2006 dimana El-Niño menyebabkan durasi *upwelling* lebih panjang, yang biasanya 3 bulan menjadi 4 bulan.

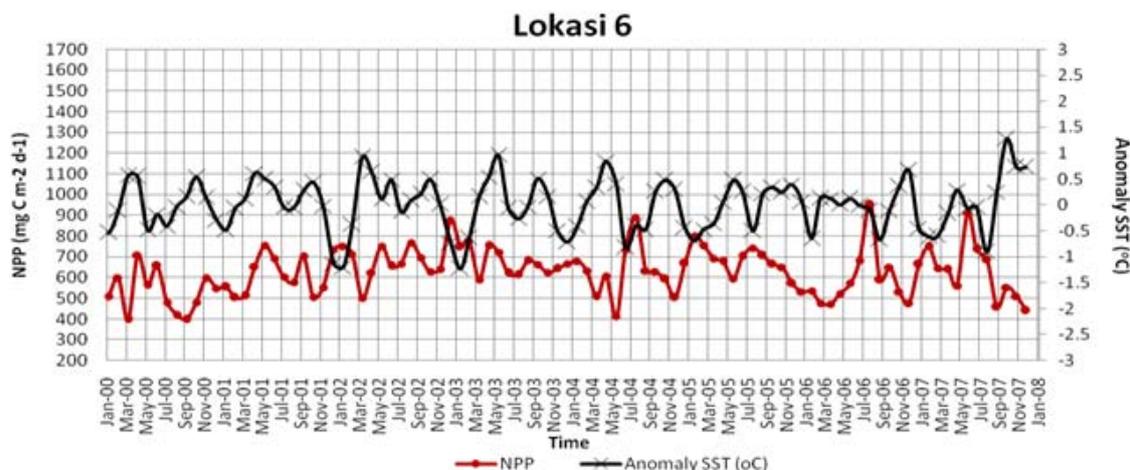
Pada perairan Laut Maluku Utara di sekitar Sulawesi Utara seperti ditunjukkan oleh lokasi 5 pada Gambar 1, nilai rata-rata NPP umumnya berkisar 450-600 mgCm⁻² per hari kecuali pada bulan Juli sampai September (Gambar 6). Pada bulan-bulan tersebut terjadi peningkatan rata-rata NPP mencapai 200-500 mgCm⁻² per hari. Peningkatan NPP ini terjadi bersamaan dengan penurunan SST mencapai 0,5-1,45°C di bawah rata-rata SST selama tahun pengamatan (28,27°C).



Gambar 5. Rata-rata produktivitas primer bersih (NPP) dan anomali temperatur permukaan laut (SST) di perairan Teluk Bone.



Gambar 6. Rata-rata produktivitas primer bersih (NPP) dan anomali temperatur permukaan laut (SST) di perairan Laut Maluku Utara.



Gambar 7. Rata-rata produktivitas primer dan anomali SST di perairan Laut Halmahera.

Secara umum dengan melihat pola dari SST dan NPP di perairan Laut Maluku ini terlihat suatu proses tiap tahunnya yang menyebabkan terjadinya penurunan SST dan meningkatnya NPP perairan, yaitu *upwelling*. Namun jika diamati durasi dan intensitasnya cenderung pendek dan lemah, kecuali pada beberapa waktu yang bertepatan dengan terjadinya El-Niño.

Jika dibandingkan dengan lokasi-lokasi sebelumnya, Laut Halmahera tidak menunjukkan pola yang jelas pada perubahan SST maupun NPP nya. Namun masih dapat terlihat adanya pengaruh musim, dimana sekitar bulan Desember-Februari (musim barat) dan Juni-Agustus (musim timur) terjadi peningkatan NPP berkisar 100–300 mgCm⁻² per hari dibandingkan bulan-bulan lain yang rata-rata NPP nya berkisar 400–600 mgCm⁻² per hari. Berbeda pula dibandingkan lokasi yang lain dimana peningkatan NPP tidak selalu bersamaan dengan terjadinya penurunan SST, terutama pada musim timur (Gambar 7).

3.2. Pembahasan

Hasil perhitungan untuk keenam lokasi menunjukkan perbedaan variasi NPP, namun secara umum peningkatan NPP terjadi pada saat musim timur. Selain itu dari grafik-grafik di atas (Gambar 2

hingga Gambar 7) dapat dilihat juga bahwa pada lokasi dengan durasi *upwelling* yang lebih panjang menyebabkan peningkatan NPP di lokasi tersebut cenderung lebih tinggi dibandingkan lokasi lain yang durasi *upwelling*nya lebih pendek. Pada lokasi yang sudah diketahui terjadinya *upwelling*, pada kondisi normal durasi *upwelling* di perairan selatan Jawa sampai Nusa Tenggara Timur dan Laut Banda menunjukkan durasi yang paling lama berkisar 3-4 bulan tiap tahunnya dengan peningkatan NPP mencapai 200–800 mgCm⁻² per hari. Sementara di perairan barat Sumatera, umumnya durasi *upwelling* hanya sekitar 2–3 bulan tiap tahun dengan peningkatan NPP sekitar 100–250 mgCm⁻² per hari.

Intensitas (kekuatan) *upwelling* yang dilihat dari tingkat penurunan temperatur permukaan laut (SST) juga terlihat bervariasi di setiap wilayah dan waktu terjadinya. Tidak hanya menunjukkan durasi yang paling panjang, perairan selatan Jawa sampai Nusa Tenggara Timur (NTT) dan Laut Banda juga menunjukkan intensitas *upwelling* yang paling tinggi dibandingkan lokasi-lokasi lainnya dengan penurunan SST mencapai 2°C di bawah SST rata-rata saat musim timur (tahun-tahun normal). Selain pengaruh pola angin (angin timur) dan

kondisi geografis di sekitar perairan, hal ini dapat disebabkan oleh adanya wilayah perairan yang cukup dalam (palung) di sekitar wilayah ini (Putri, 2005; Gordon and Susanto, 2001)

Saat angin timur berhembus, kondisi arus permukaan seperti dikemukakan Wyrki (1961) menyebabkan massa air dari Laut Banda di bawa keluar dalam jumlah yang besar. Angin timur juga menimbulkan transport Ekman ke arah lepas pantai di sepanjang perairan selatan Jawa sampai Nusa Tenggara Timur (NTT). Kondisi-kondisi tersebut menyebabkan kekosongan massa di kedua wilayah tersebut, maka terjadilah pengangkatan massa air dari laut dalam untuk mengisi kekosongan massa air permukaan. Umumnya temperatur akan berkurang terhadap kedalaman, sehingga wajar jika massa air dari laut dalam ini menyebabkan penurunan suhu yang lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya.

Di perairan barat Sumatera terlihat pola yang jelas terjadinya peningkatan NPP pada saat musim timur, walaupun besar peningkatannya tidak sebesar perairan selatan Jawa Timur sampai NTT dan Laut Banda (kecuali pada tahun 2006). Susanto *et al.* (2001) menyebutkan bahwa kondisi geografis pantai Pulau Sumatera yang membentuk sudut dari utara sampai selatan serta pengaruh parameter *coriolis* yang sangat dipengaruhi lintang menyebabkan intensitas *upwelling* yang terjadi akibat bertiupnya angin timur melemah ke arah ekuator. Mungkin hal inilah yang menyebabkan *upwelling* di perairan barat Sumatera tidak terlalu kuat.

Tidak seperti perairan barat Sumatera, perairan selatan Jawa Timur sampai NTT dan Laut Banda merupakan lokasi yang sudah diketahui dengan pasti terjadinya *upwelling* dari penelitian-penelitian sebelumnya, Teluk Bone, Laut Maluku dan Laut Halmahera merupakan daerah dugaan terjadinya *upwelling*

(Nontji, 1993). Hasil Penelitian ini menunjukkan terjadinya proses *upwelling* tiap tahunnya saat musim timur pada perairan Teluk Bone dan Laut Maluku. Umumnya *upwelling* yang meningkatkan NPP berkisar 200–500 mgCm⁻² per hari ini terjadi dalam durasi 2-3 bulan, dengan intensitas yang tidak sekuat perairan selatan Jawa Timur sampai NTT dan Laut Banda. Dimana penurunan SST hanya mencapai sekitar 1,2 °C (Teluk Bone) dan 0,8 °C (Laut Maluku) di bawah SST rata-ratanya. Maka dari Gambar 4. dan Gambar 5. Sudah dapat terlihat dengan cukup jelas adanya proses *upwelling* di kedua lokasi ini.

Khusus untuk Laut Halmahera (Lokasi 6, Gambar 1.) yang juga merupakan daerah dugaan *upwelling* (Nontji, 1993), dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak terjadi proses *upwelling* musiman seperti pada lokasi-lokasi lainnya. Walaupun dalam tiap tahun terjadi peningkatan NPP pada waktu-waktu tertentu, namun peningkatan ini tidak selalu disertai dengan penurunan SST, sehingga belum dapat dikatakan bahwa proses *upwelling* lah yang menyebabkan kenaikan NPP tersebut. Kondisi yang menunjukkan terjadinya proses *upwelling* ditemukan pada waktu-waktu tertentu, yaitu pada tahun-tahun dimana terdeteksi terjadinya El-Niño. Saat El-Niño, terjadi penurunan SST sekitar 0,8–1,2 °C disertai peningkatan NPP, seperti pada pertengahan tahun 2002, awal tahun 2003, pertengahan tahun 2004, dan akhir tahun 2006.

Dari Gambar 2 sampai Gambar 7 juga dapat terlihat bahwa beberapa kejadian *upwelling* dapat memiliki durasi yang lebih panjang ataupun intensitas yang jauh meningkat dibandingkan pada kondisi normal, sehingga umumnya NPP perairan menjadi lebih tinggi. Kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan terjadinya fenomena-fenomena oseanografi seperti El Niño/La Niña-Southern Oscillation

(ENSO) di Samudera Pasifik dan *dipole mode* (DM) di Samudera Hindia. Keterkaitan antara ENSO dan dipole mode dengan meningkatnya produktivitas perairan juga pernah dilakukan oleh Susanto and Marra (2005). Pengaruh *dipole mode* yang cukup kuat dapat dilihat di perairan barat Sumatera pada tahun 2006 dimana terjadi *dipole mode* positif sehingga durasi *upwelling* menjadi lebih panjang (mencapai 4 bulan, sedangkan pada tahun normal hanya berkisar 2–3 bulan) dan intensitasnya meningkat cukup besar (penurunan temperatur mencapai 2,2°C di bawah rata-rata). Selain itu pengaruh ini juga dapat dilihat di perairan selatan Jawa Timur, walaupun masih belum memungkinkan untuk memisahkan antara pengaruh dipole mode dan ENSO.

Durasi yang lebih lama dan intensitas yang semakin tinggi ini menyebabkan peningkatan NPP yang jauh lebih besar dibandingkan tahun-tahun lainnya, yaitu nilai NPP yang biasanya hanya mencapai 650 mgCm⁻² per hari pada tahun normal, pada saat *dipole mode* positif dapat mencapai 1100 mgCm⁻² per hari. Saat *dipole mode* positif, tekanan udara di atas Sumatera lebih tinggi dibandingkan Samudera Hindia Barat sehingga terjadi aliran udara dari Sumatera ke Samudera Hindia Barat (Hermawan dan Komalaningsih, 2008) yang menyebabkan terjadi penumpukkan massa air di wilayah ini yang kemudian menekan kolom air. Di Indonesia sendiri (sekitar Sumatera) terjadi pengangkatan kolom air sehingga termoklin tidak sedalam biasanya. Vinayachandran *et al.* (2002) juga melaporkan dangkalnya termoklin di wilayah perairan barat Sumatera saat dipole mode positif. Lebih dangkalnya lapisan termoklin maka akan

lebih mudah untuk angin timur menyebabkan *upwelling*, sehingga intensitas *upwelling* meningkat.

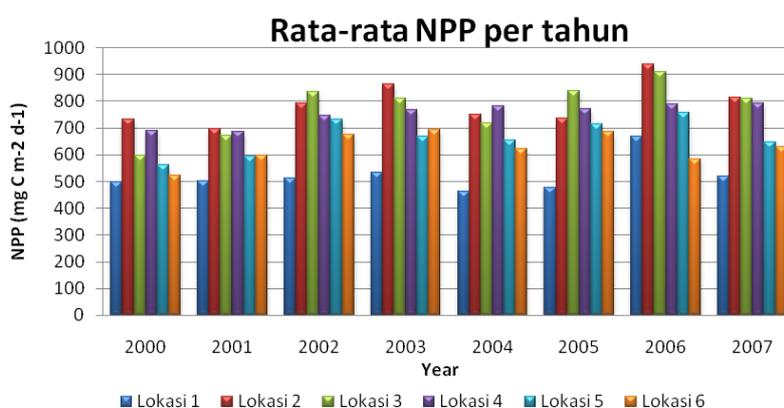
Pengaruh ENSO yang cukup jelas dapat dilihat pada Laut Banda (lokasi 3), dan Teluk Bone (Lokasi 4). Di lokasi-lokasi ini dapat terlihat bahwa pada waktu-waktu dimana terjadi El-Niño penurunan temperatur permukaan laut lebih kuat dan durasi nya lebih panjang menyebabkan peningkatan NPP yang cenderung lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun normal dan tahun La-Niña. Saat El-Niño, angin pasat tenggara melemah menyebabkan kolom panas Pasifik bergerak ke timur sehingga terjadi penumpukkan massa di Pasifik Timur, sedangkan di Pasifik barat (termasuk wilayah Indonesia) terjadi kekosongan massa sehingga massa air dalam akan terangkat ke lapisan permukaan (termoklin menjadi lebih dangkal).

Lebih dangkalnya termoklin di bagian timur Indonesia juga di laporkan oleh Susanto *et al.* (2004). Dangkalnya termoklin menyebabkan proses *upwelling* yang terjadi akibat bertiupnya angin timur menjadi lebih kuat. Pengaruh ENSO paling jelas dapat terlihat pada Laut Maluku dan Laut Halmahera. Bahkan jika diamati dari hasil yang didapatkan, durasi dan intensitas *upwelling* di Laut Maluku cenderung sangat pendek dan lemah kecuali saat terjadinya El-Niño. Sedangkan di Laut Halmahera seperti yang sudah disebutkan di atas, wilayah ini memiliki indikasi terjadinya *upwelling* hanya pada saat terjadinya El-Niño. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dikemukakan Sukresno (2010) dimana pengaruh ENSO terhadap variabilitas SST di perairan Inonesia, memiliki korelasi yang paling tinggi di Laut Maluku.

Tabel 2. *Oceanic Niño Index* (ONI) dari anomali *sea surface temperatur* (SST) pada wilayah Niño 3.4 (Sumber: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.6	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
2001	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	-0.1
2002	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.4
2003	1.2	0.9	0.5	0.1	-0.1	0.1	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
2005	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	-0.1	-0.4	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.9	1.1	1.1
2007	0.8	0.4	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-1.0	-1.1	-1.3

Keterangan: Merah (El-Niño), biru (La-Niña), dan hitam (normal)



Gambar 8. Rata-rata tahunan produktivitas primer bersih di tiap lokasi pengamatan (2000-2007).

Dengan melihat nilai rata-rata tahunan NPP pada ke enam lokasi di atas (Gambar 8.), dapat dikatakan bahwa dengan adanya fenomena *upwelling* di perairan-perairan tersebut telah menjamin tingkat produktivitas di perairan tersebut. Baik dengan adanya ENSO dan *dipole mode* ataupun tidak, secara normal rata-rata produktivitas di perairan-perairan tersebut cukup tinggi. Fenomena-fenomena tersebut hanya akan mempengaruhi intensitas dan durasi *upwelling*, sehingga tingkat produktivitas perairan akan berubah, namun tidak drastis.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dengan metode CbPM diperoleh rata-rata

produktivitas primer bersih (NPP) di perairan Indonesia tahun 2000–2007 berkisar antara 640–1070 mgCm⁻² per hari. Dimana terjadi peningkatan rata-rata NPP pada bulan Juni sampai September tiap tahunnya (740–1070 mgCm⁻² per hari), yang berkaitan dengan terjadinya proses *upwelling* di beberapa wilayah perairan Indonesia.

Lokasi dengan durasi *upwelling* lebih panjang berkisar antara 3-4 bulan dan intensitas lebih tinggi dengan penurunan temperatur mencapai >2°C di bawah rata-rata normal yang terjadi di selatan Jawa Timur sampai NTT dan Laut Banda, menghasilkan rata-rata NPP yang lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya. Dari ketiga lokasi yang diduga *upwelling*, Teluk Bone dan Laut Maluku menunjukkan terjadinya *upwelling* setiap

musim timur dengan durasi 2–3 bulan dan dengan penurunan temperatur berkisar 0,5–1,8°C di bawah rata-rata selama tahun pengamatan. Namun di Laut Halmahera tidak ditemukan terjadinya *upwelling*, kecuali pada saat terjadinya El-Niño.

Fenomena El-Niño dan *dipole mode* positif yang terjadi di perairan Indonesia umumnya menyebabkan durasi *upwelling* yang lebih lama dan intensitas *upwelling* meningkat (penurunan temperatur permukaan lebih rendah) sehingga menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun normal. Walaupun demikian, baik dengan adanya ENSO dan *dipole mode* ataupun tidak, rata-rata produktivitas di perairan-perairan tersebut cukup baik, yaitu dengan nilai rata-rata NPP perairan diatas 400 mgCm⁻² per hari.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Pendidikan Tinggi (DIKTI) melalui program Hibah Bersaing tahun anggaran 2011 dengan judul “Potensi Perairan Laut Indonesia dalam Penyerapan CO₂ dari Atmosfer sebagai Salah Satu Faktor Pengontrol Perubahan Iklim”

DAFTAR PUSTAKA

- Behrenfeld, M.J., E. Boss., D.A. Siegel., and D.M. Shea. 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, 19:1-14.
- Gordon, A.L. and R.D. Susanto. 2001. Banda sea surface-layer divergence. *Ocean Dynamics J.*: 52:2-10.
- Hernawan, E., dan K. Komalaningsih. 2008. Karakteristik indian ocean dipole mode di Samudera Hindia hubungannya dengan perilaku curah hujan di kawasan Sumatera Barat berbasis analisis mother wavelet. *J. Sains Dirgantara*, 5(2):109-129.
- Kemili, P. 2011. Estimasi produktivitas primer di perairan Indonesia menggunakan metode carbon-based production model. Tugas akhir. Program Studi Oseanografi. Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian. Institut Teknologi Bandung.
- Levinton, J.S. 2009. Marine biology: function, biodiversity, ecology. 3th ed. Oxford. New York. 225-276pp.
- Nontji, A. 1993. Laut nusantara. Penerbit Djambatan. Jakarta. 79-84pp.
- Putri, M.R. 2005. Study of ocean climate variability (1959-2002) in the Eastern Indian Ocean, Java Sea and Sunda Strait using the HAMBURG shelf ocean model. Disertasi. Hamburg University.
- Siswanto and Suratno, 2008. Seasonal pattern of wind induced *upwelling* over Java-Bali sea waters and surrounding area, *International J. of Remote Sensing and Earth Science*, 5:46-56.
- Suciaty, F., M.R. Putri, dan I.M. Radjawanne. 2008. Identifikasi *upwelling* menggunakan produktivitas primer di perairan Indonesia bagian timur. Prosiding SEMNASKAN UGM, Yogyakarta, 26 Juli 2008.
- Sukresno, B. 2010. Empirical orthogonal functions (EOF) analysis of SST variability in Indonesian water concerning with ENSO and IOD. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: XXXVIII, Kyoto Japan 2010.
- Susanto, R.L. and Marra. 2005. Effect of the 1997/98 El Niño on chlorophyll a variability along the southern coasts of Java and Sumatra, *Oceanography*, 18(4):124-127.

- Susanto, R.D., A.L. Gordon, and Q. Zheng. 2004. *Upwelling* within the Indonesian Seas and its relation to ENSO and Monsoon. Columbia University.
- Vinayachandran, P.N., S. Iizuka, and T. Yamagata. 2002. Indian Ocean dipole mode events in an ocean general circulation model. *Deep-Sea Research II*, 49:1573–1596.
- Wyrtki, K. 1961. The physical oceanography of south east Asian waters. *Naga Report* Vol. 2. University California Press., La Jolla, California. 195p.