

**VARIABILITAS SUHU PERMUKAAN LAUT DAN KONSENTRASI KLOOROFIL-A
DI PERAIRAN TELUK JAKARTA DAN SEKITARNYA**

***SEA SURFACE TEMPERATURE DAN CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION
VARIABILITIES OF JAKARTA BAY AND ITS SURROUNDING WATERS***

Bisman Nababan

Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor

Email: bisman@ipb.ac.id; simson_naban@yahoo.com

ABSTRACT

Variability of sea surface temperature (SST) and the concentration of chlorophyll-a (Chla) in Jakarta Bay and its surrounding waters were analyzed based on the time series data of monthly mean SST and Chla estimated by NOAA AVHRR, SeaWiFS, and MODIS satellites for 17 years (1997 to 2014). Generally, the monthly mean SST values fluctuated seasonally with the semi-annual pattern with the maximum value occurred in the second transitional season (Oct-Nov) and relatively high in the first transitional season (Mar). In contrast, the minimum of monthly mean SST values was found during the east season (Jul) and relatively low during the west season (Des-Jan). SST variabilities were generally associated with the sun position, sea water circulation, and rainfall. Based on MODIS data, the minimum-maximum of monthly mean SST ranged of 28.39°C-32.58°C. Seasonal fluctuations with the semi-annual pattern also occurred in the monthly mean Chla values with the maximum value occurred during the west season (Des-Jan) and relatively high values occurred during the east season (Jun). In contrast, the minimum of the monthly mean Chla was found during the second transition season (Sep-Oct) and relatively low during the first transitional season (March-Apr). The minimum-maximum of monthly mean Chla ranged of 0.09 mg/m³-2.50 mg/m³. Chla fluctuations were generally associated with the variabilities of rainfall, river water discharge, and sea water circulation of the Java Sea. Anomalous climatic factors such as El Nino Southern Oscillation (ENSO) and La Nina produced a significant impact on the SST and Chla interannual variability. Generally, the ENSO phenomenon lowers the value SST and Chla, while La Nina events tended to increase Chla values.

Keywords: *sea surface temperature, chlorophyll-a, fluctuation, NOAA AVHRR, SeaWiFS, MODIS*

ABSTRAK

Variabilitas suhu permukaan laut (SPL) dan konsentrasi klorofil-a (Chla) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dianalisis berdasarkan data *time series* rata-rata bulanan SPL dan Chla hasil estimasi satelit NOAA AVHRR, SeaWiFS, dan MODIS selama 17 tahun (1997-2014). Umumnya, nilai rata-rata bulanan SPL berfluktuasi berdasarkan musim dengan pola *semi-annual* dimana nilai maksimum terjadi pada musim peralihan II (Okt-Nov) dan relatif tinggi pada musim peralihan I (Mar). Sebaliknya, nilai rata-rata bulanan SPL minimum ditemui pada musim timur (Jul) dan relatif rendah pada musim barat (Des-Jan). Fluktuasi nilai SPL umumnya berkaitan dengan posisi matahari, pergerakan massa air di Laut Jawa, dan curah hujan. Berdasarkan data MODIS, kisaran nilai rata-rata bulanan SPL adalah 28,39°C (Jul, musim timur)- 32,58°C (Okt, musim peralihan II). Fluktuasi musiman dengan pola *semi-annual* juga terjadi pada nilai rata-rata bulanan Chla dimana nilai maksimum terjadi pada musim barat (Des-Jan) dan nilai relatif tinggi terjadi pada musim timur (Jun). Sebaliknya, nilai rata-rata bulanan Chla minimum terjadi pada musim peralihan II (Sep-Okt) dan relatif rendah pada musim peralihan I (Mar-Apr). Kisaran nilai rata-rata bulanan Chla adalah 0,09-2,50 mg/m³. Fluktuasi Chla ini berkaitan dengan jumlah curah hujan, debit air sungai yang bermuara ke Teluk Jakarta dan sekitarnya, dan pergerakan massa air laut di Laut Jawa. Faktor iklim anomali seperti El Nino Southern Oscillation (ENSO) dan La Nina memberikan dampak nyata pada fluktuasi *interannual* SPL dan Chla. Umumnya, fenomena ENSO menurunkan nilai SPL dan Chla sedangkan La Nina meningkatkan nilai Chla.

Kata kunci: suhu permukaan laut, klorofil-a, musim, fluktuasi, NOAA AVHRR, SeaWiFS, MODIS

I. PENDAHULUAN

Teluk Jakarta yang terletak di sebelah utara kota Jakarta memiliki posisi dan peranan yang sangat strategis mengingat di daerah ini terdapat pelabuhan internasional, pelabuhan perikanan, daerah rekreasi dan perhotelan, lokasi budi daya perikanan dan perikanan tangkap, dan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap (UNESCO, 2000). Perairan Teluk Jakarta yang relatif datar dengan variasi kedalaman 1-24 meter dengan rata-rata kedalaman 15 m juga merupakan muara sungai dari 3 (tiga) sungai besar seperti Sungai Cisadane, Sungai Ciliwung, dan Sungai Citarum serta 10 (sepuluh) sungai kecil lainnya seperti S. Kamal, S. Cengkareng, S. Angke, S. Karang, S. Ancol, S. Sunter, S. Cakung, S. Blencong, S. Grogol, dan Sungai Pensangrahan (Koropitan *et al.*, 2009).

Sirkulasi massa air di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya secara umum dipengaruhi oleh pasut dan pergerakan angin Muson di Indonesia seperti angin Muson Barat Laut (angin yang berhembus dari arah Barat Laut yang umum disebut sebagai Musim Barat pada bulan Desember-Februari) dan angin Muson Tenggara (angin yang berasal dari arah Tenggara yang umum disebut sebagai Musim Timur pada bulan Juni-Agustus). Pada periode Musim Barat, curah hujan umumnya tinggi sedangkan pada periode Musim Timur curah hujan umumnya rendah di Indonesia (Aldrian and Susanto, 2003; Ningsih *et al.*, 2000; Wyrтки, 1961). Periode diantara kedua musim ini arah angin berubah-ubah dan disebut sebagai musim peralihan I (Maret-Mei) dan Musim Peralihan II (September-November). Faktor sirkulasi massa air laut dan Angin Muson mempengaruhi fluktuasi konsentrasi klorofil-a (Chla) dan suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta (Koropitan and Ikeda, 2016; Siregar dan Koropitan, 2013; Damar *et al.*, 2012; Koropitan *et al.*, 2009; Damar, 2003).

Tekanan lingkungan pada perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya semakin me-

ningkat dengan semakin meningkatnya pembangunan perumahan, perkantoran, dan industri, serta jumlah penduduk di Jakarta dan kota-kota penyangga Jakarta seperti Bekasi, Tangerang, Depok, dan Bogor. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, kepadatan penduduk dalam kurun waktu 10 tahun (2005-2014) di daerah provinsi DKI Jakarta bertambah sebesar 26% (12.012 jiwa/km² pada tahun 2005 menjadi 15.173 jiwa/km² pada tahun 2014), di daerah provinsi Jawa Barat bertambah sebesar 23% (1.060 jiwa/km² pada tahun 2005 menjadi 1.301 jiwa/km² pada tahun 2014), dan di daerah provinsi Banten bertambah sebesar 20% (1.006 jiwa/km² pada tahun 2005 menjadi 1.211 jiwa/km² pada tahun 2014) (BPS, 2016). Peningkatan jumlah penduduk yang cukup besar ini secara langsung atau tidak langsung akan memberikan tekanan lingkungan yang semakin berat pada perairan Teluk Jakarta mengingat Teluk Jakarta merupakan tempat bermuaranya sekitar 13 sungai besar dan kecil dari daerah daratan provinsi DKI Jakarta, Jawa Barat, dan Banten.

Sumber bahan pencemar ke perairan Teluk Jakarta umumnya berasal dari limbah rumah tangga (63.327.610 m³/tahun), limbah industri pengolahan (3.226.427.890 m³/tahun), dan limbah pertanian (216.670 m³/tahun) (BPLHD *dalam* Helfinalis, 2004). Jumlah limbah yang masuk ke perairan Teluk Jakarta ini cenderung meningkat dari tahun ke tahun mengingat belum adanya penanganan pengolahan limbah badan air yang masuk ke Teluk Jakarta. Berdasarkan hasil penelitian Lembaga Oseanologi Nasional, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia pada tahun 1975-1979 perairan Teluk Jakarta sudah mengalami proses eutrofikasi dengan meningkatnya kadar unsur nutrient fosfat dengan nilai kisaran antara 0,1-2,9 µg A/l, nitrat dengan kisaran 0,1-6,9 µg A/l, dan kadar silikat antara 0,2-78,0 µg A/l dimana nilai tertinggi dari ketiga unsur ini ditemui pada musim barat (Praseno dan Kastoro, 1979). Ilahude (1995) juga melaporkan kandungan fosfat yang ting-

gi pada musim barat di bagian barat Teluk Jakarta sebesar 0,60 $\mu\text{g/l}$.

Berdasarkan penelitian *in situ* terdahulu, konsentrasi klorofil-a di Teluk Jakarta berkisar antara 0,21-31,60 mg/m^3 dengan rata-rata per tahun sebesar 8,43 mg/m^3 (Damar, 2003). Berdasarkan hasil estimasi satelit, konsentrasi klorofil-a di Teluk Jakarta bernilai tinggi (2,5-3 mg/m^3) pada daerah muara sungai dan >10 mg/m^3 untuk daerah dekat pantai pada musim peralihan (Maret dan April) (Hendiarti *et al.*, 2004). Hasil penelitian lain dari ekstraksi data satelit MO DIS menyebutkan bahwa konsentrasi klorofil-a pada musim barat (1,00-7,13 mg/m^3) lebih tinggi dibandingkan pada musim timur (0,50-6,36 mg/m^3) (Meliani, 2006). Hasil penelitian Prihartato (2007) juga menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a di perairan Teluk Jakarta cenderung tinggi pada musim barat dan cenderung rendah pada musim peralihan I dan II (April-Mei, September-Oktober). Sedangkan pada musim timur, juga ditemui konsentrasi klorofil-a yang relatif tinggi (Prihartato, 2007).

Berdasarkan hasil studi terdahulu terkait variabilitas suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta bahwa nilai suhu permukaan laut terendah ditemui pada musim barat (28,5°C) dan tertinggi terjadi pada musim timur atau musim peralihan II (31,0°C) (Ilahude, 1995). Pada penelitian lainnya, Razak dan Muchtar (2003) melaporkan bahwa suhu permukaan laut di perairan Teluk Jakarta pada bulan Juni (rata-rata 29,42°C) dan bulan September (rata-rata 29,69°C) tidak memperlihatkan perbedaan yang nyata. Namun, suhu permukaan laut yang berbeda nyata ditemui pada perairan dekat PLTU Muara Karang (rata-rata 32,0°C) disebabkan oleh thermal pollution dari PLTU Muara Karang (Razak dan Muchtar, 2003).

Perairan Teluk Jakarta belakangan ini menjadi sangat sering diperbincangkan dan menjadi isu politik mengingat di daerah ini akan dikembangkan proyek reklamasi besar-besaran. Proyek reklamasi Teluk Jakarta ini direncanakan akan menghasilkan areal darat-

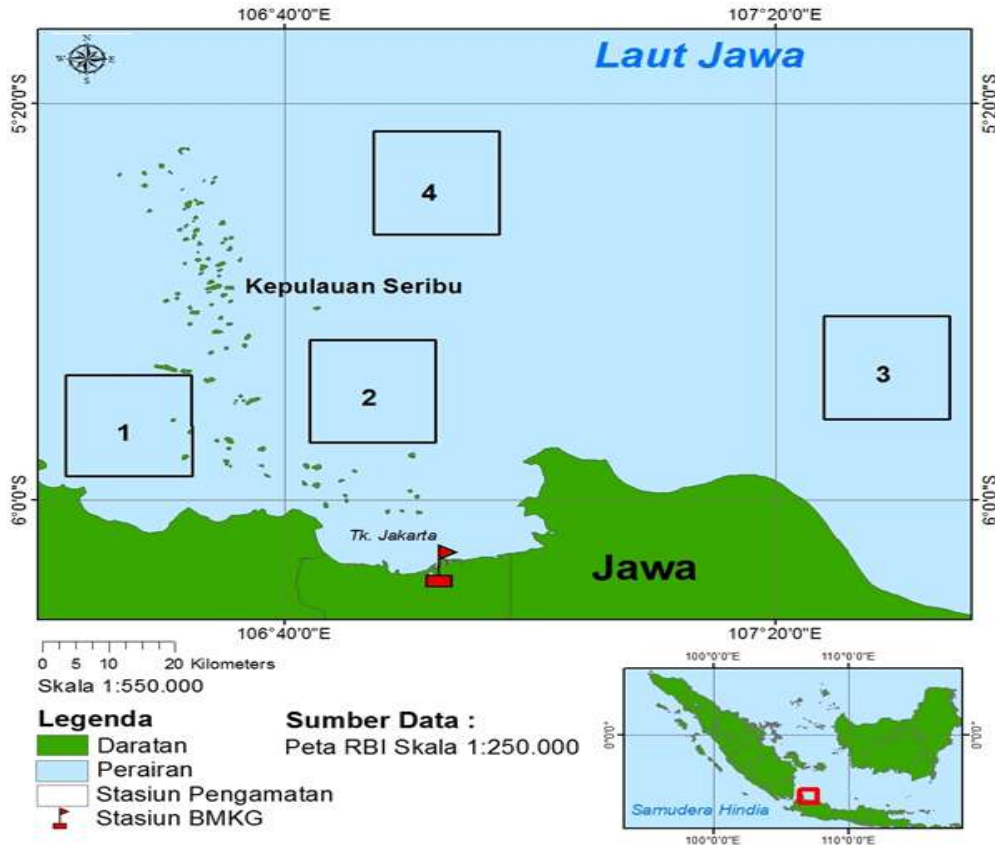
an tambahan di atas perairan Teluk Jakarta seluas 51.000 ha yang akan menghasilkan sebanyak 17 pulau dan proyek tanggul raksasa (*giant sea wall*) (Pemprov DKI, 2015). Pembangunan reklamasi ini akan berdampak terhadap ekosistem bentik, proses oseanografi fisik dan biologi, serta kehidupan nelayan di sekitarnya (Nababan, 2016).

Adanya perbedaan hasil temuan ini terhadap variabilitas konsentrasi klorofil-a dan suhu permukaan laut di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya, masih terbatasnya referensi ilmiah terkait fluktuasi Chla dan SPL di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya, dan perlunya data base untuk pengembangan reklamasi Teluk Jakarta dan sekitarnya maka penelitian dengan menggunakan data satelit multisensor dan jangka waktu yang lebih lama (17 tahun) sangat penting dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fluktuasi suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya serta menentukan faktor penyebab yang mempengaruhi fluktuasinya.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Studi

Lokasi penelitian adalah perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya yang terletak di bagian utara kota Jakarta pada posisi koordinat sekitar 6.20°-5.00° LS dan 106.33-107.60 BT (Gambar 1). Untuk menentukan nilai variabilitas suhu permukaan laut (SPL) dan konsentrasi klorofil-a (Chla) di perairan Teluk Jakarta dipilih 4 (empat) lokasi (kotak persegi) secara subjektif yang dianggap dapat mewakili daerah perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya seperti Stasiun1 di sebelah barat Teluk Jakarta dengan koordinat 5,96°-5,79°LS; 106,37°-106,54°BT, Stasiun2 di sekitar Teluk Jakarta dekat garis pantai dengan koordinat 5,90°-5,73°LS; 106,70°-106,87°BT, Stasiun 3 di sebelah timur Teluk Jakarta dengan koordinat 5,86°-5,69°LS; 107,40°-107,57°BT, dan Stasiun4 di daerah offshore Teluk Jakarta dengan koordinat 5,46°-5,38°LS; 106,79°-106,96°BT (Gambar1).



Gambar 1. Lokasi studi di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya. Empat kotak adalah lokasi ekstraksi data SPL dan Chla dari satelit NOAA AVHRR, SeaWiFS dan MODIS. Peta inset menunjukkan lokasi studi pada peta Indonesia bagian barat. Data curah hujan diperoleh dari stasiun BMKG Tanjung Priok.

Nilai SPL dan Chla dari satelit NOAA AVHRR, SeaWiFS, dan MODIS diekstrak dari keempat kotak tersebut untuk mempelajari variabilitas SPL dan Klorofil-a secara spasial dan temporal. Ukuran pixel pada setiap kotak pada satelit dengan resolusi $4 \times 4 \text{ km}^2$ seperti AVHRR dan MODIS adalah 5×5 pixel sedangkan untuk satelit dengan resolusi $9 \times 9 \text{ km}^2$ seperti SeaWiFS adalah 2×2 pixel.

2.2. Data dan Analisis

Data Chla rata-rata bulanan diekstrak dari data satelit *ocean color* SeaWiFS level 3 dengan resolusi spasial $9 \times 9 \text{ km}^2$ dan MODIS Aqua dan Terra level 3 dengan resolusi spasial $4 \times 4 \text{ km}^2$. Data Chla dari satelit SeaWiFS diekstrak dari 2×2 ukuran pixel sedangkan dari satelit MODIS diekstrak dari 5×5 ukuran

pixel. Data Chla dari satelit SeaWiFS memiliki rentang waktu dari September 1997 – Desember 2010, sedangkan data Chla dari satelit MODIS memiliki rentang waktu Juli 2002 – Desember 2014. Data Chla dari kedua satelit ini (SeaWiFS dan MODIS) diekstrak dengan menggunakan *Giovanni - Interactive Visualization and Analysis* (GIOVANNI v4. 21) software yang disediakan secara gratis dan *on line* oleh *Goddard Space Flight Center, National Aeronatic Space Agency* (GSFC -NASA) (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>) (Acker and Leptoukh, 2007).

Konsentrasi Chla dari satelit SeaWiFS diestimasi dengan menggunakan algoritma 4-band klorofil laut (*Ocean Chlorophyll*) versi 4 (OC4v4) (O'Reilly *et al.*, 2000). Sedangkan, konsentrasi Chla dari satelit MODIS diestimasi dengan mengguna-

kan algoritma *Ocean Chlorophyll MODIS* (OC3M).

Untuk mengurangi ketidak akuratan (kesalahan estimasi) dalam estimasi Chla akibat pengaruh materi partikulat tersuspensi, reflektansi permukaan dasar, dan kondisi perairan kasus-2, maka nilai-nilai yang dianggap tidak *valid* dihilangkan seperti data yang memiliki nilai konsentrasi Chla 3-5 kali lebih besar dari nilai Chla sebelum atau sesudah bulan tersebut. Untuk mengatasi nilai-nilai yang dianggap tidak *valid* tersebut, dilakukan proses perhitungan *5 month moving average* untuk mengganti nilai-nilai ekstrim (tidak *valid*). Hal ini dilakukan berdasarkan pra analisis data dimana sangat jarang ditemukan nilai rata-rata bulanan dari bulan ke satu dan ke bulan kedua dan seterusnya yang melebihi nilai rata-rata diatas 3-5 kali nilai rata-rata bulan sebelum atau sesudahnya.

Ketersediaan data Chla rata-rata bulanan hasil estimasi satelit SeaWiFS dan MODIS ditemui rentang waktu yang tumpang tindih yaitu antara Juli 2002 – Desember 2010. Berdasarkan perbandingan data dari kedua satelit ini, ditemui bahwa nilai Chla hasil estimasi satelit MODIS secara umum sedikit lebih rendah dibandingkan dengan data Chla hasil estimasi satelit SeaWiFS, sehingga untuk analisis deret waktu (*time series*) data Chla dari SeaWiFS dan MODIS digabung dengan melakukan proses perhitungan rata-rata dari kedua data satelit tersebut.

Data SPL mingguan untuk malam dan siang hari diekstrak dari citra satelit NOAA AVHRR Pathfinder v5 dengan resolusi spasial 4x4 km² atau 5x5 ukuran pixel untuk empat stasiun yang telah ditentukan pada periode September 1997 - Desember 2009 dengan menggunakan software *PO.DAAC Live Access Server (LASv8.4.3)* yang tersedia secara gratis dan *on line* (<http://podaac.jpl.nasa.gov/las>). Nilai SPL dari satelit NOAA AVHRR ini diestimasi dengan menggunakan algoritma Pathfinder v5 (Kilpatrick *et al.*, 2001) yang didasarkan pada algoritma NOAA operasional yaitu *nonlinear*

sea surface temperature (NLSST) yang dikembangkan oleh Walton *et al.* (1998) seperti berikut:

$$SST_{sat} = a + b T_4 + c (T_4 - T_5) SST_{guess} + d (T_4 - T_5) [\sec(\theta) - 1] \dots\dots\dots (1)$$

dimana SST_{sat} adalah suhu permukaan laut (SPL) hasil estimasi dari satelit, T_4 dan T_5 suhu kecerahan pada kanal 10.8 dan 11.4 μm dari AVHRR kanal 4 dan kanal 5, SST_{guess} adalah nilai SPL "*first-guess*", θ adalah sudut zenith satelit, a, b, c, dan d adalah koefisien yang diestimasi dari analisis regresi *data matching SPL in situ* dan estimasi satelit.

Algoritma Pathfinder dikembangkan dengan menggunakan dasar algoritma NLSST dengan membedakan *regime* ($T_4 - T_5$) yang disingkat dengan T_{45} dengan formula sebagai berikut:

$$PFSST = wPFSST1 + (1-w) PFSST2 \dots\dots (2)$$

dimana PFSST adalah SST Pathfinder, PFSST1 dan PFSST2 adalah SST yang dihitung berdasarkan algoritma koefisien untuk regime T_{45} rendah dan tinggi, w adalah faktor pemberat yang berbeda sesuai dengan dengan fungsi T_{45} sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_{45} \leq 0,58^{\circ}C, & \quad w = 1.0; \\ 0,58^{\circ}C < T_{45} < 0,98^{\circ}C, & \quad w = 1 - [(T_{45} - 0,5^{\circ}) / (0,9^{\circ} - 0,5^{\circ})]; \\ T_{45} \geq 0,98^{\circ}C, & \quad w = 0.0 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

Algoritma Pathfinder ini selanjutnya diuji dengan data *in situ* berdasarkan *temporal weighting, region of latitude*, dan dievaluasi berdasarkan *test pixel by pixel* dengan *quality flags* seperti *cloud test, uniformity test1, uniformity test2, zenith angle test1, zenith angle test2, reference test, stray sunlight test, edge test, dan glint test*. Berdasarkan serangkaian uji ini, hasil estimasi SPL menggunakan algoritma Pathfinder diharapkan menjadi lebih akurat dibandingkan dengan algoritma lainnya (Kilpatrick *et al.*, 2001).

Data SPL mingguan untuk malam dan siang hari yang diekstrak untuk empat stasiun

di perairan Teluk Jakarta dilakukan proses “validasi data” dengan melihat tingkat keseragaman data. Data SPL yang ekstrim seperti data SPL yang jauh dari nilai “wajar” dihilangkan. Secara umum, data SPL yang wajar dari satelit NOAA AVHRR di perairan Teluk Jakarta adalah pada kisaran $25 < \text{SPL} < 35^\circ\text{C}$, dengan demikian data SPL di luar rentang nilai ini menjadi data SPL yang tidak valid. Rentang data “valid” ini dipilih berdasarkan data SPL hasil pengukuran di lapangan sebelumnya yang berada pada rentang nilai ini. Setelah “proses validasi” ($25 < \text{SPL} < 35^\circ\text{C}$) selesai dilakukan, kemudian dilakukan lagi uji validasi data lanjutan dengan melihat keseragaman data pada ukuran 5×5 pixel yang diekstrak dengan catatan bilamana ada data SPL yang “ekstrim” dari nilai kebanyakan dan nilai kewajaran maka nilai tersebut juga dihilangkan.

Akibat keterbatasan data SPL Pathfinder v5 dari satelit NOAA AVHRR, data SPL dari MODIS 11 micron dengan resolusi $4 \times 4 \text{ km}^2$ juga digunakan untuk periode Juli 2002-Desember 2014. Data SPL dari satelit MODIS ini diekstrak dengan menggunakan *Giovanni - Interactive Visualization and Analysis* (GIOVANNI v4.21) software yang disediakan secara gratis dan on line oleh *Goddard Space Flight Center, National Aeronautic Space Agency* (GSFC-NASA) (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>) (Acker and Leptoukh, 2007). Data mingguan siang dan malam hari kemudian dijumlahkan dan dilakukan perataan untuk memperoleh data rata-rata bulanan.

Ketersediaan data SPL rata-rata bulanan hasil estimasi satelit NOAA AVHRR dan MODIS ditemui rentang waktu yang tumpang tindih yaitu antara Juli 2002 – Desember 2010. Berdasarkan perbandingan data dari kedua satelit ini, ditemui bahwa nilai SPL hasil estimasi satelit MODIS secara umum lebih rendah dibandingkan dengan data SPL hasil estimasi satelit NOAA AVHRR Pathfinder v5. Dengan demikian, untuk analisis deret waktu (*time series*) khususnya

dengan faktor penyebab fluktuasi nilai SPL, maka data SPL yang digunakan berasal dari data MODIS.

Beberapa data SPL dan Chla tidak ditemui mengingat tutupan awan yang sangat tinggi. Nababan *et al.* (2011) melaporkan bahwa tutupan awan bulanan di atas perairan Indonesia bisa mencapai hingga 90-96%. Untuk mengatasi data yang kosong ini, linear interpolasi dilakukan terhadap data sebelum dan setelah data kosong.

Data tambahan seperti curah hujan rata-rata bulanan untuk periode September 1997-Desember 2014 diperoleh dari stasiun Badan Meteorologi dan Klimatologi Geofisika (BMKG) stasiun Tanjung Priok dengan koordinat $6,11^\circ\text{LS}$ dan $106,88^\circ\text{BT}$.

2.3. Analisis *Interannual*

Untuk analisis *interannual* dari variabilitas SPL dan Chla, *Southern Oscillation Index* (SOI) digunakan sebagai indikator untuk menentukan dampak variabilitas *interannual* terhadap nilai SPL dan Chla khususnya pada periode El Nino Southern Oscillation (ENSO) dan La Nina. *Southern Oscillation Index* (SOI) adalah index yang diukur berdasarkan perbedaan tekanan udara di Tahiti dan Darwin, dan umumnya digunakan sebagai petunjuk untuk menentukan periode *El Nino* dan *La Nina*. Nilai SOI negatif terjadi bila rata-rata tekanan udara di Tahiti lebih rendah dari rata-rata tekanan udara di Darwin. Pada saat nilai SOI negatif, nilai SPL di daerah tropis bagian timur Lautan Pasifik umumnya lebih tinggi dari nilai SPL pada kondisi normal. Sementara kalau nilai SOI positif, nilai SPL di daerah tropis bagian timur Lautan Pasifik umumnya lebih rendah dari kondisi normal. Periode yang termasuk dalam kategori ENSO adalah kondisi pada saat nilai SOI index ≤ -10 , sementara periode pada kategori La Nina terjadi pada saat nilai SOI index ≥ 10 (Tritel, 2010). Berdasarkan data SOI index bulanan (Gambar 2) dan kategori ini, periode yang masuk kedalam kategori ENSO dan La Nina disajikan pada Table 1.



Gambar 2. Data SOI index bulanan dan *five month running mean of SOI index* yang menggambarkan periode ENSO (SOI index < -10) dan non-ENSO (La Nina) (SOI index > 10). Note: pada x-axis, O=Oktober, F=Februari, dan J=Juni.

Table 1. Daftar periode ENSO dan La Nina berdasarkan data SOI index.

Tahun	Bulan ENSO	Bulan La Nina
1997	Sep., Okt., Nop.	-
1998	Jan., Feb., Mar., Apr.	Jul., Sep., Okt., Nov., Des.
1999	-	Jan., Apr., Nov., Des.
2000	-	Feb., Apr., Nov.
2001	-	Feb.
2002	Mei, Agu., Des.	-
2003	-	-
2004	Jan., Apr., Jun.	-
2005	Feb., Apr., Mei	Okt.
2006	Agu., Okt.	Jan., Mar., Apr.
2007	-	Des.
2008	-	Jan., Feb., Mar., Sep., Okt., Nop., Des.
2009	Okt.	Feb.
2010	Jan., Feb., Mar.	Jul., Agu., Okt., Nov., Des.
2011	-	Jan., Feb., Mar., Apr., Jul., Sep., Nov.
2012	Jun.	-
2013	-	Mar., Jun.
2014	Mar., Agu., Nop.	Jan.

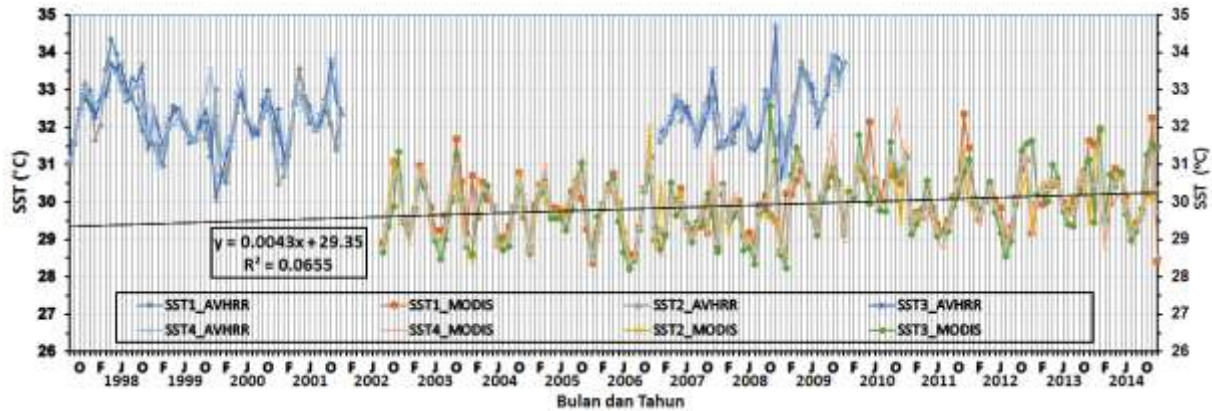
Periode yang bukan termasuk periode ENSO dan La Nina dikategorikan kepada periode normal. Data SOI index bulanan diperoleh dari *the Australian Bureau of Meteorology* (<http://www.bom.gov.au/climate/current/soi>).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Suhu Permukaan Laut

Berdasarkan hasil analisis suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dari data satelit NOAA

AVHRR Pathfinder v5 dan satelit MODIS 11 micron diperoleh hasil bahwa secara umum hasil estimasi SPL dari satelit NOAA AVHRR Pathfinder v5 lebih tinggi dibandingkan dengan hasil estimasi SPL dari satelit MODIS 11 micron dengan rata-rata perbedaan SPL sebesar $2,65 \pm 0,72^\circ\text{C}$ (Gambar 3). Perbedaan hasil estimasi SPL dari dua satelit yang sangat nyata ini membuat penulis menampilkan hasil estimasi SPL dari kedua satelit tersebut secara terpisah dalam analisis variabilitas SPL.



Gambar 3. Fluktuasi musiman suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya berdasarkan estimasi satelit NOAA AVHRR Pathfinder dan MODIS. Garis terputus menandakan bahwa data SPL NOAA AVHRR Pathfinder tidak ada (*missing*). Grafik menunjukkan bahwa secara umum SPL estimasi satelit NOAA AVHRR lebih tinggi dari estimasi satelit MODIS. Note: pada x-axis, O=Oktober, F=Februari, dan J=Juni.

Adanya perbedaan nyata antara hasil estimasi SPL dari satelit NOAA AVHRR Pathfinder dengan satelit MODIS mungkin disebabkan oleh karena kedua satelit menggunakan algoritma yang berbeda dan adanya perbedaan kisaran panjang gelombang pada kanal 4 dan 5 satelit AVHRR *vs.* kisaran panjang gelombang pada kanal 31 dan kanal 32 satelit MODIS. Secara umum, kisaran panjang gelombang pada kanal 4 dan 5 satelit AVHRR (kanal 4=10,3-11,3 μm ; kanal 5=11,5-12,4 μm) lebih panjang dibandingkan dengan kisaran panjang gelombang kanal 31 dan 32 pada satelit MODIS (kanal 31=10,780-11,260 μm , kanal 32=11,770-12,270 μm). Dengan semakin besarnya kisaran panjang gelombang pada kanal 4 dan 5 pada satelit AVHRR *vs.* kanal 31 dan 32 pada satelit MODIS, maka radiasi emisi infra red yang diterima sensor satelit AVHRR menjadi lebih besar dibandingkan dengan radiasi emisi infra red pada kondisi alam dan atmosfer yang sama yang pada akhirnya akan menghasilkan estimasi suhu permukaan laut yang lebih besar pada satelit NOAA AVHRR. Faktor lain yang mungkin mempengaruhi lebih tingginya nilai SPL estimasi NOAA AVHRR Pathfinder dibandingkan SPL estimasi satelit MODIS adalah bahwa didalam

algoritma NOAA AVHRR Pathfinder proses koreksi atmosfer dilakukan lebih ekstensif dibandingkan dengan algoritma MODIS sehingga pengaruh awan tipis atau uap air lebih tereliminasi pada algoritma Pathfinder dibandingkan dengan algoritma MODIS.

Suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya umumnya berfluktuasi berdasarkan musim dengan pola *semi-annual* dimana umumnya nilai SPL maksimum terjadi pada musim peralihan II (Oktober-November) dan relatif tinggi pada musim peralihan I (Maret-Mei), sedangkan nilai SPL minimum terjadi pada musim Timur (Juli) dan relatif rendah pada musim Barat (Desember-Februari) (Gambar 3). Kisaran nilai SPL yang relatif tinggi (puncak bawah) dan maksimum (puncak atas) hasil estimasi satelit NOAA AVHRR Pathfinder adalah 32,46°C (April 1999, musim peralihan I) – 34,70°C (November 2008, musim peralihan II), sedangkan kisaran nilai SPL yang relatif rendah dan minimum berkisar dari 30,07°C (Desember 1999, musim barat) sampai 32,04°C (Juli 2009, musim timur). Kisaran nilai SPL dari MODIS yang relatif tinggi (puncak bawah) dan nilai maksimum (puncak atas) berkisar dari 30,58°C (April 2011, musim peralihan I) sampai 32,58°C

(Oktober 2008, musim peralihan II), sedangkan kisaran SPL dari nilai minimum sampai nilai yang relatif rendah berkisar dari 28,21°C (Agustus 2006, musim timur) sampai 30,01°C (Januari 2013, musim barat) (Gambar 3).

Nilai SPL yang relatif tinggi pada musim peralihan I (Maret-Mei) dan II (Oktober-November) mungkin disebabkan karena pada periode ini posisi matahari terhadap perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya relatif lebih dekat dibandingkan dengan posisi matahari pada musim barat dan timur. Musim hujan dan kandungan uap air yang relatif lebih tinggi pada musim barat (Desember-Februari) menjadi salah satu faktor penyebab turunnya nilai SPL pada musim ini.

Berdasarkan data satelit MODIS selama 12 tahun (2003-2014), hasil analisis data rata-rata SPL bulanan menunjukkan adanya trend positif terhadap peningkatan SPL di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dengan laju 0,05°C/tahun (Gambar 3). Hasil ini sesuai dengan trend peningkatan suhu global yang terus meningkat semenjak tahun 1884 (NASA, 2016) serta trend positif peningkatan SPL di perairan Indonesia (Nababan dan Gaol, 2010) sebagai akibat dari peningkatan gas-gas rumah kaca di atmosfer (NOAA-ESRL, 2016; Fekete *et al.*, 2013; Ballantyne *et al.*, 2012).

3.2. Konsentrasi Klorofil-a

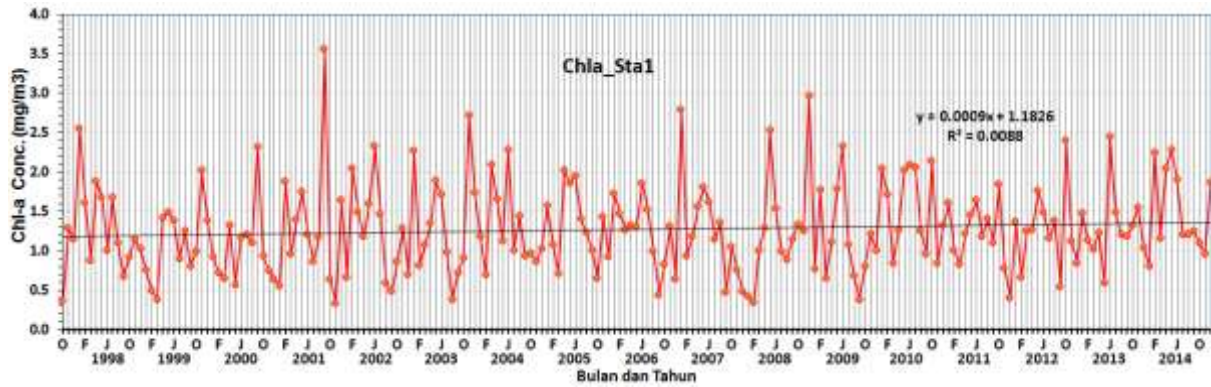
Berdasarkan hasil analisis nilai konsentrasi klorofil-a (Chla) dari estimasi satelit SeaWiFS dan satelit MODIS diperoleh bahwa nilai Chla dari kedua satelit tersebut tidak memperlihatkan perbedaan nilai yang nyata sehingga dalam penelitian ini nilai estimasi Chla dari satelit SeaWiFS dan MODIS dirata-ratakan untuk kurun waktu Juli 2002 – Desember 2010 mengingat pada kurun waktu tersebut tersedia data estimasi Chla dari satelit SeaWiFS maupun satelit MODIS.

Untuk mempelajari pola fluktuasi Chla di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya, data Chla untuk stasiun1 (paling dekat garis pantai) di sebelah barat perairan Teluk

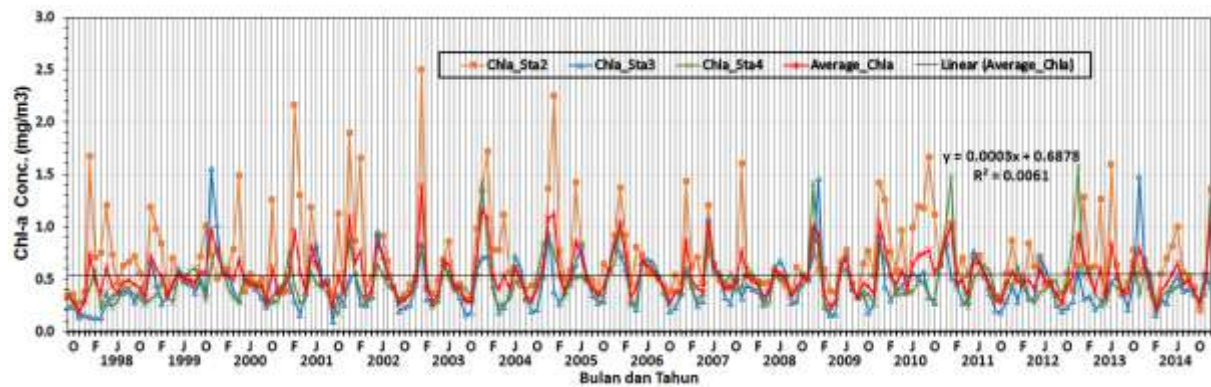
Jakarta dipisahkan dengan data Chla dari stasiun2, 3, dan 4. Hal ini dilakukan karena berdasarkan hasil analisis, pada lokasi stasiun1, pola fluktuasi Chla kurang beraturan dibandingkan dengan pola fluktuasi Chla di stasiun 2, 3, dan 4.

Pola fluktuasi Chla di stasiun1 (lokasi paling dekat dengan garis pantai di sebelah barat Teluk Jakarta) secara umum tidak menunjukkan pola musiman teratur dimana nilai Chla yang relatif rendah dapat ditemui pada bulan Januari, Februari, Maret, Mei, Agustus, September, Oktober, Nopember, dan Desember untuk setiap tahunnya (Gambar 4). Kisaran nilai Chla yang relatif rendah bernilai 0,33 mg/m³ (Nopember 2001) – 0,96 mg/m³ (Nopember 2014). Sementara nilai Chla yang relatif tinggi ditemui pada bulan Januari, Februari, April, Mei, Juni, September, Oktober, dan Desember tiap tahunnya dengan kisaran nilai 1,15 mg/m³ (Nopember 1998) – 3,56mg/m³ (September 2001) (Gambar 4). Pola musiman yang tidak teratur pada stasiun1 mungkin disebabkan karena lokasinya yang paling dekat ke arah garis pantai di Teluk Jakarta dan lokasi industri pembangkit listrik tenaga uap yang berdekatan dengan lokasi ini yang mungkin menyebabkan load bahan organik menjadi tidak hanya berasal dari aliran sungai dan deposisi atmosfer.

Pola fluktuasi Chla di lokasi stasiun2, 3, dan 4, memperlihatkan fluktuasi musiman yang jelas dengan pola *semi-annual* dimana nilai Chla yang relatif tinggi (puncak bawah dan puncak atas) ditemui pada musim timur (Juni) dan musim barat (Desember-Februari). Kisaran nilai yang relatif tinggi berkisar dari 0,55 mg/m³ (stasiun4, Juni 2008) – 2,50 mg/m³ (stasiun2, Januari 2002). Sedangkan nilai yang relatif rendah berkisar 0,09 mg/m³ (stasiun3, September 2001) – 0,27 mg/m³ (stasiun2, April 2012) (Gambar 5). Nilai Chla maksimum yang ditemui pada musim barat diakibatkan oleh tingginya curah hujan pada musim barat yang membawa banyak unsur nutrient dari daratan melalui aliran sungai ke Teluk Jakarta dan nutrient dari *atmospheric wet deposition* (Damar *et al.*, 2012; Koropi-



Gambar 4. Fluktuasi dan trend nilai Chla bulanan di lokasi stasiun1 (paling dekat garis pantai di sebelah barat Teluk Jakarta) yang memperlihatkan pola fluktuasi musiman yang kurang teratur dengan trend nilai Chla positif. Note: pada x-axis, O=Oktober, F=Februari, dan J=Juni.



Gambar 5. Fluktuasi dan trend nilai Chla bulanan di lokasi stasiun2, 3, dan 4 yang memperlihatkan pola fluktuasi musiman yang jelas dengan trend nilai Chla positif. Note: pada x-axis, O=Oktober, F=Februari, dan J=Juni.

tan *et al.*, 2009). Sedangkan nilai Chla yang relatif tinggi pada musim timur, disebabkan oleh faktor massa air yang bergerak dari Laut Jawa bagian timur yang melewati perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dimana massa air ini memiliki kandungan nutrient dan Chla yang relatif lebih tinggi mengingat pada musim timur umumnya proses upwelling terjadi di sekitar perairan bagian selatan Selat Makassar (Nababan *et al.*, 2006; Atmadipoera *et al.*, 2016; Atmadipoera and Widyastuti, 2014; Habibi *et al.*, 2010). Hal ini juga terlihat dari nilai SPL yang relatif lebih rendah pada musim timur di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya.

Berdasarkan analisis data Chla pada stasiun2, 3, dan 4, diperoleh bahwa trend Chla juga mengikuti trend SPL yang bernilai positif dengan laju 0,0036 mg/m³/thn (Gambar 5). Hal ini membuktikan penelitian terdahulu bahwa di Teluk Jakarta terjadi peningkatan unsur hara (eutropikasi) (Damar, 2003; Wouthuyzen, 2007).

3.3. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Fluktuasi SST dan Chla

Fluktuasi nilai SPL di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya secara umum dipengaruhi oleh perbedaan musim akibat pengaruh pergerakan posisi matahari terhadap bumi. Perbedaan musim ini ditandai dengan peru-

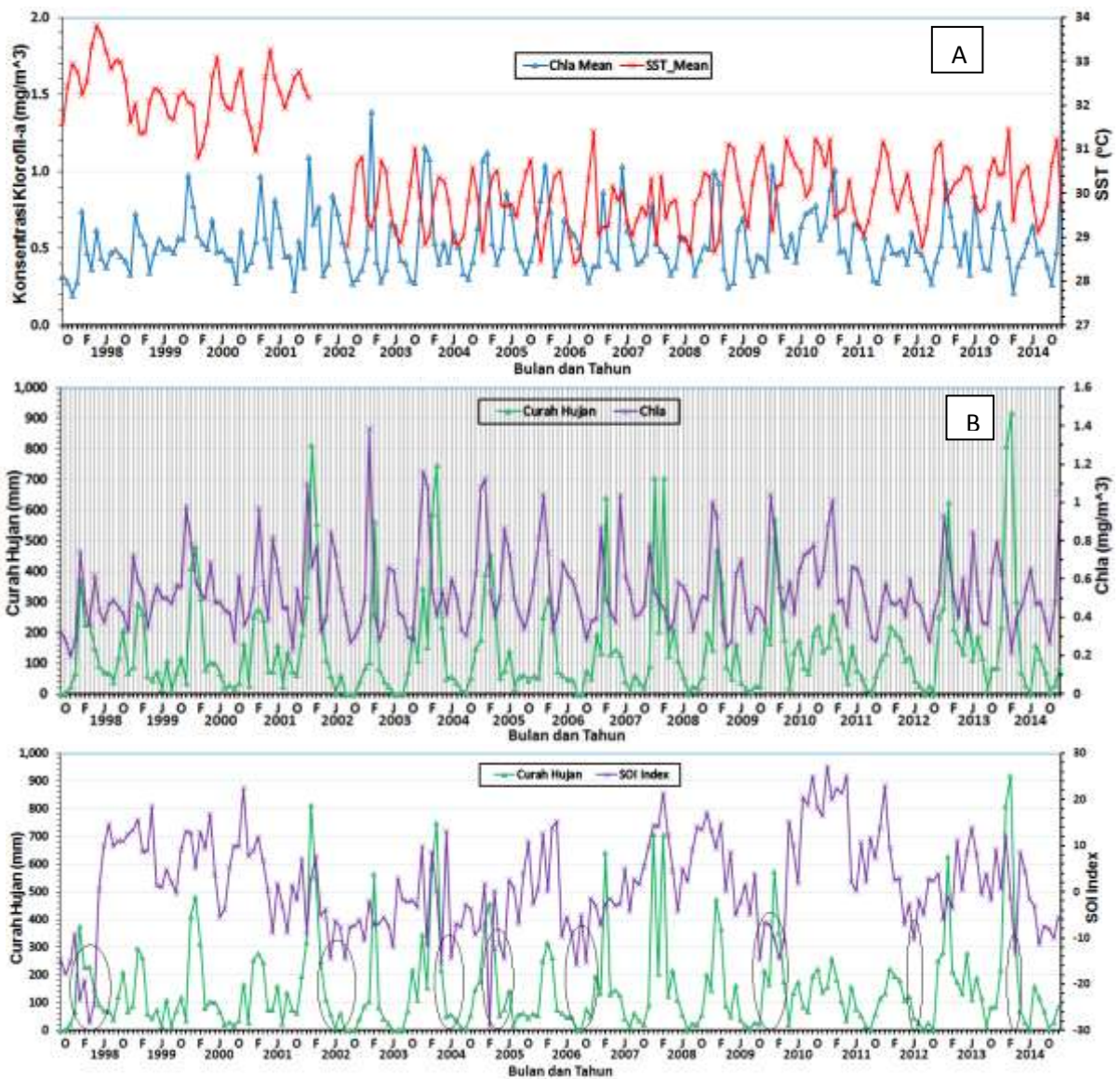
bahan pergerakan angin yang melintasi perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya. Secara umum, perbedaan musim di Indonesia seperti halnya di Teluk Jakarta dan sekitarnya dipengaruhi oleh angin Muson Timur yang bertiup dari arah Timur atau Timur Laut pada bulan Juni-Juli-Agustus. Pada bulan-bulan ini juga sering disebut sebagai Musim Timur. Angin ini berasal dari daratan Australia yang mengandung sedikit uap air melewati perairan Indonesia dan mengakibatkan musim kemarau di Indonesia. Sebaliknya, pada bulan Desember, Januari, Februari, angin Muson berhembus dari arah Barat atau Barat Laut yang berasal dari daratan Asian melewati Lautan China Selatan dan mengandung banyak uap air mengakibatkan curah hujan yang tinggi (musim hujan) terjadi di Indonesia. Pada bulan Maret, April, Mei terjadi arah angin yang tidak menentu yang disebut sebagai Musim Peralihan I, sedangkan pada bulan September, Oktober, Nopember juga ditemui arah angin yang tidak menentu yang disebut musim Peralihan II (Gordon, 2005; Ningsih *et al.* 2000; Wyrky, 1961).

Berdasarkan rata-rata nilai SPL dari empat stasiun pengamatan di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya, diperoleh bahwa nilai SPL berfluktuasi secara musiman dengan pola *semi-annual* dimana ditemui nilai yang relatif tinggi pada musim peralihan I (Maret-Mei) dan maksimum pada musim peralihan II (Oktober-Nopember) serta nilai yang relatif rendah terjadi pada musim barat (Desember-Februari) dan minimum pada musim timur (Juli) (Gambar 7A).

Tingginya curah hujan atau kandungan uap air di atmosfer pada musim barat (Desember-Februari) dapat mengakibatkan menurunnya suhu permukaan laut di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya akibat tutupan awan dan banyaknya kandungan uap air di atmosfer yang dapat mempengaruhi penurunan estimasi SPL dari satelit. Curah hujan maksimum di daerah perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya terjadi pada musim barat (Februari=918,3 mm) dan minimum (0 mm) terjadi pada musim timur (Juni-Agustus) dan

musim peralihan II (September-Oktober) (Gambar 7B). Faktor kecepatan angin yang lebih tinggi pada musim barat dibandingkan pada musim lainnya di daerah ini (Prihartato, 2009) juga dapat mendorong terjadinya proses *vertical mixing* air laut yang dapat mengakibatkan penurunan suhu permukaan laut.

Nilai SPL yang relatif rendah pada musim timur (Juni-Agustus) dapat terjadi karena umumnya pada musim timur massa air laut dari perairan bagian selatan Selat Makassar-Laut Jawa bagian timur bergerak menuju Laut Jawa bagian barat sampai perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya (Koropitan and Ikeda, 2016; Koropitan *et al.*, 2009; Syahdan *et al.*, 2014). Pada musim timur (Juni-Agustus), proses upwelling umumnya terjadi di perairan bagian selatan Selat Makassar dimana nilai SPL di daerah ini bisa mencapai 25,7°C (Nababan *et al.*, 2016; Atmadipoera *et al.*, 2016; Atmadipoera and Widyastuti, 2014; Habibi *et al.*, 2010). Massa air laut yang relatif dingin yang berasal dari bagian selatan Selat Makassar ini kemudian terbawa arus yang bergerak ke arah barat menuju perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya menjadikan nilai SPL di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya menjadi relatif lebih rendah pada musim timur dibanding musim peralihan sebelum dan sesudahnya. Faktor lain yang menyebabkan menurunnya SPL pada musim timur ini adalah karena posisi matahari yang paling jauh (paling utara) pada musim timur sehingga jumlah radiasi yang diterima permukaan laut di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya relatif lebih rendah pada musim timur dibandingkan dengan musim lainnya yang secara langsung berpengaruh terhadap SPL di daerah ini. Faktor lain yang menyebabkan menurunnya SPL pada musim timur ini adalah karena posisi matahari yang paling jauh (paling utara) pada musim timur sehingga jumlah radiasi yang diterima permukaan laut di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya relatif lebih rendah pada musim timur dibandingkan dengan musim lainnya yang secara langsung berpengaruh terhadap SPL di daerah ini.



Gambar 7. Fluktuasi rata-rata Chla dan SST (A), rata-rata curah hujan dan Chla (B), dan rata-rata curah hujan dan SOI index (C). Gambar lingkaran pada gambar (C) menunjukkan periode ENSO yang memperlihatkan nilai curah hujan yang relatif lebih rendah. Note: pada x-axis, O=Oktober, F=Februari, dan J=Juni.

Suhu maksimum yang terjadi pada musim peralihan II (Oktober-Nopember) dan SPL yang relatif tinggi pada musim peralihan I (Maret) disebabkan oleh karena jumlah uap air yang relatif lebih sedikit di atmosfer dan posisi matahari yang relatif lebih dekat ke perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dibandingkan pada musim barat dan musim timur.

Nilai Chla rata-rata dari tiga stasiun pengamatan (stasiun 2, 3, dan 4) di perairan

Teluk Jakarta dan sekitarnya berfluktuasi secara musiman dimana nilai maksimum Chla terjadi pada musim barat (Desember-Januari) dan relatif tinggi terjadi pada musim timur (Mei-Juni) (lihat Gambar 7A). Nilai Chla yang maksimum pada musim barat (Desember-Januari) dapat disebabkan oleh tingginya curah hujan pada musim ini (Gambar 7B) sehingga nutrient yang terbawa oleh air sungai ke Teluk Jakarta dan sekitarnya relatif

meningkat akibat meningkatnya debit air sungai yang bermuara ke Teluk Jakarta dan sekitarnya (Damar *et al.*, 2012). Peningkatan nutrient ini dapat mengakibatkan peningkatan populasi fitoplankton di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi klorofil-a (Chla) di lokasi ini (Gambar 7B). Namun demikian, pada kejadian curah hujan maksimum yang umumnya terjadi pada musim barat bulan Februari umumnya tidak diikuti dengan nilai Chla yang maksimum (nilai Chla maksimum umumnya terjadi pada bulan Desember/ Januari) (Gambar 7B). Hal ini mungkin disebabkan karena bahan organik dari daratan sudah tergerus oleh curah hujan yang relatif tinggi pada musim barat bulan Desember dan Januari sebelumnya. Faktor kecepatan angin barat yang berhembus dari arah barat laut atau barat dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan musim lainnya (Prihartato, 2009) dapat mengakibatkan terjadinya *vertical mixing* di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya yang dapat mengakibatkan meningkatnya nutrient di permukaan air laut di lokasi ini.

Nilai Chla yang relatif tinggi pada musim timur (Mei-Juni) dapat disebabkan oleh massa air laut yang bergerak dari arah bagian Selatan Selat Makassar/Laut Jawa bagian timur menuju perairan Teluk Jakarta membawa massa air yang memiliki nilai Chla yang relatif lebih tinggi akibat terjadinya upwelling di perairan bagian selatan Selat Makassar pada musim timur (Nababan *et al.*, 2016; Atmadipoera *et al.*, 2016; Atmadipoera and Widyastuti, 2014; Habibi *et al.*, 2010).

Secara umum, pada periode ENSO (tanda lingkaran pada Gambar 7C) terlihat jumlah curah hujan relatif lebih rendah dibandingkan pada musim yang sama pada periode non-ENSO lainnya. Konsentrasi klorofil-a (Chla) pada periode ENSO ini juga terlihat relatif lebih rendah dibandingkan dengan Chla pada periode yang sama di tahun-tahun non-ENSO lainnya. Hal ini disebabkan karena menurunnya debit air sungai yang

membawa nutrient khususnya yang berasal dari sungai-sungai yang bermuara ke perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya. Sedangkan pada periode La-Nina, jumlah curah hujan cenderung lebih tinggi dibandingkan pada periode non-La-Nina lainnya. Nilai Chla pada periode La-Nina ini juga cenderung lebih tinggi pada periode La-Nina dibandingkan dengan periode non-La-Nina lainnya (Gambar 7C). Hal ini disebabkan karena dengan meningkatnya curah hujan pada periode La-Nina maka jumlah nutrient yang terbawa oleh air sungai dari daratan relatif lebih tinggi dibandingkan dengan periode non-La-Nina lainnya.

3.4. Fluktuasi Antar Tahun (*Interannual*) SPL dan Chla

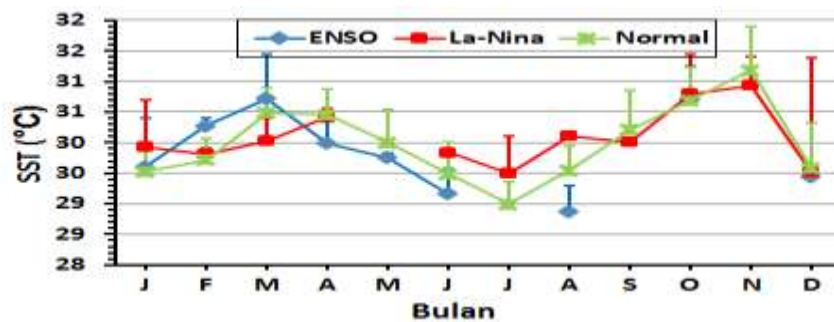
Analisis fluktuasi antar tahun (*interannual*) nilai SPL dan Chla dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata bulanan SPL dari 4 (empat) stasiun dan nilai rata-rata bulanan Chla dari 3 (tiga) stasiun (stasiun 2, 3, dan 4) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya pada periode ENSO, normal, dan La-Nina. Periode ENSO adalah periode dimana nilai SOI index ≤ -10 , periode La-Nina pada saat index SOI ≥ 10 , dan periode normal pada saat nilai indeks SOI diantara periode ENSO dan La-Nina ($-10 < \text{index SOI} < 10$) (lihat Tabel 1). Khusus untuk nilai Chla dilakukan perataan untuk stasiun 2, 3, dan 4 mengingat pola nilai Chla dari ketiga stasiun ini memiliki pola yang sama dan berbeda dengan pola nilai Chla stasiun 1. Nilai rata-rata bulanan SPL yang digunakan pada analisis ini hanya berasal dari nilai SPL estimasi satelit MODIS. Nilai SPL estimasi satelit NOAA AVHRR Pathfinder tidak digunakan untuk analisis ini karena nilainya sangat berbeda nyata dengan nilai SPL estimasi MODIS dan data SPL dari NOAA AVHRR Pathfinder relatif lebih singkat dibandingkan dengan data yang tersedia dari MODIS.

Berdasarkan analisis antar tahunan (*interannual*), fluktuasi nilai rata-rata bulanan SPL terlihat berbeda nyata antar periode ENSO dan La-Nina pada bulan Februari-

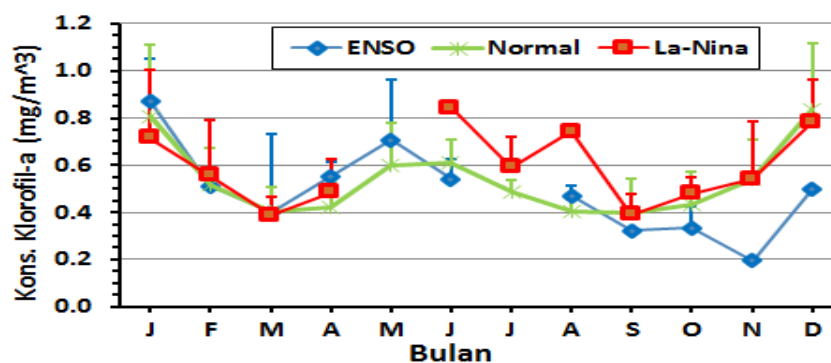
Agustus. Nilai rata-rata bulanan SPL pada bulan Februari-Maret lebih tinggi pada periode ENSO dibandingkan dengan pada periode La-Nina. Sebaliknya, pada bulan April-Agustus, nilai rata-rata bulanan SPL lebih rendah pada periode ENSO dibandingkan pada periode La-Nina (Gambar 8). Secara umum, nilai rata-rata bulanan SPL pada periode normal tidak berbeda nyata dengan nilai rata-rata bulanan SPL pada periode ENSO dan La-Nina kecuali pada musim timur (Juni, Juli, Agustus). Pada musim timur, nilai rata-rata bulanan SPL pada periode normal lebih rendah dibandingkan pada periode La-Nina dan lebih tinggi pada periode ENSO (Gambar 8).

Berdasarkan nilai rata-rata bulanan Chla, perbedaan nyata hanya ditemui pada

musim timur (Juni-Agustus), musim peralihan II (Oktober-November), dan awal musim barat (Desember) dimana secara umum dan berbeda nyata nilai Chla pada periode ENSO lebih rendah dibandingkan pada periode La-Nina (Gambar 9). Sementara pada musim lainnya, nilai Chla baik pada periode normal, ENSO, dan La-Nina tidak berbeda nyata (Gambar 9). Meningkatnya nilai Chla pada periode La-Nina disebabkan karena pada periode La-Nina umumnya curah hujan lebih tinggi dibandingkan dengan periode lainnya sehingga ketersediaan nutrisi yang terbawa dari daratan di perairan Teluk Jakarta menjadi relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pada periode lainnya.



Gambar 8. Rata-rata SPL pada periode normal (hijau), ENSO (biru), dan La-Nina (merah) di daerah perairanTeluk Jakarta dan sekitarnya. Note: garis terputus pada grafik ENSO dan La-Nina menandakan bahwa pada periode itu tidak ditemui bulan ENSO dan La-Nina.



Gambar 9. Rata-rata Chla pada periode normal (hijau), ENSO (biru), dan La-Nina (merah) di daerah perairanTeluk Jakarta dan sekitarnya. Note: garis terputus pada grafik ENSO dan La-Nina menandakan bahwa pada periode itu tidak ditemui bulan ENSO dan La-Nina.

IV. KESIMPULAN

Hasil estimasi suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya dari data satelit NOAA AVHRR Pathfinder v5 umumnya lebih tinggi dari hasil estimasi satelit MODIS 11 micron dengan nilai rata-rata perbedaan SPL sebesar $2,65 \pm 0,72^\circ\text{C}$. Hal ini disebabkan oleh perbedaan algoritma yang digunakan untuk estimasi SPL, proses koreksi atmosfer yang lebih kompleks pada algoritma Pathfinder, dan perbedaan kisaran kanal (*bandwith*) diantara kedua satelit dimana *bandwith* NOAA AVHRR lebih besar dibandingkan dengan MODIS.

Umumnya, nilai rata-rata bulanan suhu permukaan laut (SPL) di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya berfluktuasi berdasarkan musim dengan pola *semi-annual* dimana nilai maksimum terjadi pada musim peralihan II (Oktober-November) dan relatif tinggi pada musim peralihan I (Maret). Hal ini disebabkan oleh posisi matahari yang relatif lebih dekat ke perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya pada musim peralihan dibandingkan musim lainnya. Sebaliknya, nilai rata-rata bulanan SPL minimum ditemui pada musim timur (Juli) dan relatif rendah pada musim barat (Desember-Januari). Nilai SPL minimum pada musim timur diduga disebabkan oleh pergerakan massa air dari Laut Jawa bagian timur yang relatif lebih dingin karena melalui daerah upwelling di bagian selatan Selat Makassar pada musim timur dan posisi matahari yang lebih jauh dibandingkan pada musim lainnya. Nilai SPL yang relatif rendahnya pada musim barat disebabkan oleh tingginya kandungan uap air di atmosfer sehingga mempengaruhi estimasi SPL dari satelit.

Berdasarkan data MODIS, nilai rata-rata bulanan SPL minimum terjadi pada musim timur ($28,39^\circ\text{C}$) dan maksimum terjadi pada musim peralihan II ($32,58^\circ\text{C}$). Fluktuasi musiman dengan pola *semi-annual* juga terjadi pada nilai rata-rata bulanan Chla di perairan Teluk Jakarta dan

sekitarnya dimana nilai maksimum terjadi pada musim barat (Desember-Januari) dan nilai relatif tinggi terjadi pada musim timur (Juni). Nilai Chla yang maksimum pada musim barat disebabkan oleh curah hujan yang tinggi pada periode ini yang mengakibatkan kandungan nutrient yang relatif tinggi dari aliran sungai, nutrient dari deposisi atmosfer, dan kemungkinan vertical mixing akibat kecepatan angin yang lebih tinggi. Nilai Chla yang relatif tinggi pada musim timur disebabkan oleh pergerakan massa air dari bagian timur Laut Jawa yang mengandung nutrient yang relatif tinggi akibat adanya upwelling di bagian selatan Selat Makassar pada musim timur. Sebaliknya, nilai rata-rata bulanan Chla minimum terjadi pada musim peralihan II (September-Oktober) dan relatif rendah pada musim peralihan I (Maret-April). Kisaran nilai rata-rata bulanan Chla di perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya adalah $0,09 \text{ mg/m}^3$ (April 2012) - $2,50 \text{ mg/m}^3$ (Januari 2002).

Faktor iklim anomali seperti El Nino Southern Oscillation (ENSO) dan La Nina memberikan dampak nyata pada fluktuasi *interannual* SPL dan Chla. Nilai rata-rata bulanan SPL pada bulan Februari-Maret lebih tinggi pada periode ENSO dibandingkan dengan pada periode La-Nina. Sebaliknya, pada bulan April-Agustus, nilai rata-rata bulanan SPL lebih rendah pada periode ENSO dibandingkan pada periode La-Nina. Berdasarkan nilai rata-rata bulanan Chla, umumnya Chla pada periode ENSO lebih rendah dibandingkan periode La Nina pada musim timur (Juni-Agustus), musim peralihan II (Oktober-November), dan awal musim barat (Desember).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NASA GES DISC yang menyediakan “*Giovanni online data system for analyses and visualizations software*” secara online untuk digunakan mengekstrak data SPL dari MODIS dan Chla dari SeaWiFS dan

MODIS. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada podaac.jpl.nasa.gov yang menyediakan data SPL dari satelit NOAA AVHRR Pathfinder, dan BMKG untuk data klimatologi stasiun Tanjung Priok. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Romdonul Hakim yang telah membantu penulis dalam penyiapan peta lokasi penelitian. Tidak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada para mitra bebestari yang telah banyak memberikan masukan dan komentar untuk meningkatkan kualitas tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Acker, J.G. and G. Leptoukh, Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data. *Eos, Trans. AGU.*, 2007. 88(2): p. 14-17.
- Aldrian, E. and R.D. Susanto. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International J. of Climatology*, 23:1435-1452.
- Atmadipoera, A.S., S.M. Horhoruw, M. Purba, dan D.Y. Nugroho. 2016. Variasi Spasial Dan Temporal Arlindo Di Selat Makassar. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 8(1):299-320.
- Atmadipoera, A.S. and P. Widyastuti. 2014. A numerical modeling study on upwelling mechanism in Southern Makassar Strait. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(2): 355-371.
- Habibi, A., R.Y. Setiawan, and A.Y. Zuhdy. 2010. Wind-driven coastal upwelling along South of Sulawesi Island. *Indonesian J. of Marine Science*, 15(2): 115-118.
- Badan Pusat Statistik (BPS). 2016. Penduduk menurut provinsi, 2000-2014. <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/842>. [Diunduh tanggal 18 April 2016].
- Ballantyne, A.P., C.B. Alden, J.B. Miller, P.P. Tans, and J.W.C. White. 2012. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the last 50 years. *Nature*, 488:70-72.
- Damar, A., F. Colijn, K.J. Hesse, and Y. Wardiatno. 2012. The eutrophication states of Jakarta, Lampung, and Semangka Bays: nutrient and phytoplankton dynamics in Indonesian tropical waters. *J. of Tropical Biology and Conservation*, 9(1):61-81.
- Damar, A. 2003. Effects of enrichment on nutrient dynamics, phytoplankton dynamics, and primary production in Indonesian tropical waters: a comparison between Jakarta Bay, Lampung Bay, and Semangka Bay. Ph.D. Thesis. University of Kiel. Germany. 199p.
- Fekete, H., M. Vieweg, M. Rocha, N. Braun, M. Lindberg, J. Gütschow, L. Jeffrey, N. Höhne, B. Hare, M. Schaeffer, K. Macey, J. Larkin. 2013. Analysis of current greenhouse gas emission trends. Ecofys, Climate Analytics and PIK 2013 by order of Climate Works. 112p.
- Gordon, A.L. 2005. Oceanography of the Indonesian seas and their through-flow. *Oceanography*, 18:14-27, doi: 10.5670/oceanog.2005.01.
- Helfinalis. 2004. Laporan akhir penelitian sumber daya laut perairan Teluk Jakarta dan kepulauan seribu. Bidang dinamika laut. Proyek Penelitian IP-TEK Kelautan P2O-LIPI. Jakarta
- Hendiarti, N., H. Siegel, and T. Ohde. 2004. Investigation of different coastal processes in Indonesian waters using SeaWiFS data. *Deep Sea Research II*, 51:85-97.
- Ilahude, A.G. 1995. Sebaran suhu, salinitas, sigma-T, dan zat hara di perairan Teluk Jakarta. *Dalam: Suyarso (ed.). Atlas Oseanografi Teluk Jakarta. P2O-LIPI. Jakarta. Hlm.:29-100.*
- Kilpatrick, K.A., G.P. Podesta and R. Evans. 2001. Overview of the NOAA/NASA Advanced Very High Resolution Ra-

- diometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database, *J. Geophys. Res.*, 106(C5):9179-9197.
- Koropitana, A.F. and M. Ikeda. 2016. Influences of physical processes and anthropogenic influx on biogeochemical cycle in the Java Sea: numerical model experiment. *Procedia Environmental Sciences*, 33:532-552.
- Koropitan, A.F., M. Ikeda, A. Damar, and Y. Yamanaka. 2009. Influences of physical processes on the ecosystem of Jakarta Bay: a coupled physical-ecosystem model experiment. *ICES J. Mar. Sci.*, 66(2):336-348. doi:10.1093/icesjms/fsp011.
- Meliani, F. 2006. Kajian konsentrasi dan sebaran spasial klorofil-a di perairan Teluk Jakarta menggunakan citra Aqua-MODIS. Skripsi. Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 72hlm.
- Nababan, B., N. Rosyadi, D. Manurung, N. M.N. Natih, and R. Hakim. 2016. The seasonal variability of sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in the southern Makassar Strait. *Procedia Environmental Sciences*, 330(2016):583-599.
- Nababan, B. 2016. Reklamasi Teluk Jakarta untuk pusat pemerintahan. *Antara-News.com*. Minggu, 1 Mei 2016. <http://www.antaranews.com/berita/558333/reklamasi-teluk-jakarta-untuk-pusat-pemerintahan>.
- Nababan, B., B. Hasyim, and H.L.N. Bada, 2011. Variability dan validation of sea surface temperature estimated by Pathfinder Algorithm of NOAA-AVHRR satellite in the North Papua waters. *Int. J. of Remote Sensing and Earth Sciences*, 8:25-31.
- Nababan, B. dan J. L. Gaol. 2010. Trend suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a serta dampaknya terhadap penyerapan CO₂ di perairan Indonesia. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 1(edisi khusus):213-227.
- Ningsih, N.S., T. Yamashita, and L. Aouf. 2000. Three-dimensional simulation of water circulation in the Java Sea: influence of wind waves on surface and bottom stresses. *Natural Hazards*, 21:145-171.
- NASA. 2016. Global land-ocean temperature index. <http://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. [Diunduh 20 Mei 2016].
- NOAA-ESRL. 2016. Trends in atmospheric carbon dioxide. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. [Diunduh, 20 Mei 2016].
- O'Reilly, *et al.*, Ocean color chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version. *In: Hooker, S.B & E. R. Firestone (eds.)*, SeaWiFS post-launch tech. report series, volume 11, SeaWiFS postlaunch calibration and validation analysis, Part 3. Goddard Space Flight Center, Green-belt, Maryland, NASA/TM-2000-206892, 2000. 11:9-23.
- Pemprov DKI. 2015. Reklamasi 17 pulau di Teluk Jakarta dimulai 2015. <http://www.jakarta.go.id/v2/news/2014/09/reklamasi-17-pulau-di-teluk-jakarta-dimulai-2015-#.WATrASRMYGU>. [Diunduh tanggal 18 April 2016].
- Praseno, D.P. dan W. Kastoro. 1979. Evaluasi hasil pemantauan kondisi Perairan Teluk Jakarta. 1975-1979. Lembaga Oseanologi Nasional. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Jakarta. Hlm.:1-7.
- Prihartato, P.K. 2009. Studi variabilitas konsentrasi klorofil-a dengan menggunakan data satelit Aqua-MODIS dan SeaWiFS serta data in situ di Teluk Jakarta. Skripsi. Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor. Bogor. 48hlm.

- Razak, M., dan M. Muchtar. 2003. Kondisi lingkungan perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya. Laporan akhir penelitian. P2O-LIPI. Jakarta.
- Siregar, V. and A.F. Koropitan. 2013. Primary productivity of Jakarta Bay in a changing environment: anthropogenic and climate change impacts. *Biotropia*, 20(2):89-103.
- Syahdan, M., A.S. Atmadipoera, S.B. Susilo, J.L. Gaol. 2014. Variability of surface chlorophyll-a in the Makassar Strait – Java Sea, Indonesia. *International J. of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 14(2):103-116.
- Tritel, H. 2010. Understanding and forecasting ENSO. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/ElNinoresearchpaper.pdf>. [30 April 2016].
- UNESCO. 2000. Reducing megacity impacts on the coastal environment – alternative livelihoods and waste management in Jakarta and the Seribu Islands. Coastal region and small island papers 6. UNESCO. Paris. 59p.
- Walton, C.C., W.G. Pichel, and J.F. Sapper. 1998. The development and operational application of non-linear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *J. Geophys. Res.*, 103:27,999-28,012.
- Wyrtki, K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian Waters. NAGA Report Volume 3. Scripps Institution of Oceanography, University of California. La Jolla. California. 195p.
- Wouthuyzen, S. 2007. Pendeteksian dini kejadian marak alga (harmful algal bloom/HAB) perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya. Laporan kumulatif 2004-2006 P2O-LIPI. Jakarta
- Diterima* : 23 Mei 2016
Direview : 10 Juni 2016
Disetujui : 26 Juni 2016