

## DINAMIKA ANOMALI PARAS LAUT PERAIRAN INDONESIA

### DYNAMIC OF SEA LEVEL ANOMALY OF INDONESIAN WATERS

Bisman Nababan<sup>1\*</sup>, Sri Hadiani<sup>1</sup>, dan Nyoman M.N. Natih<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor; \*E-mail: bisman@ipb.ac.id

#### ABSTRACT

*A trend in sea level rise as a result of global warming could be a threat to small islands and coastal areas in Indonesia. The objective of this study was to determine the trend and variability of mean sea level anomaly (MSLA) in Indonesian waters during the 20 years of observation. The data used in this study were monthly MSLA data obtained from the AVISO website (<ftp://ftp.aviso.oceanobs.com>). Supporting data were the Southern Oscillation Index (SOI) (<http://www.gom.gov.au/climate/enso>), Dipole Indian Mode (DIM) index ([http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_Indian\\_Ocean\\_Dipole.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_Indian_Ocean_Dipole.html)), and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/>). Eight stations of Indonesian waters were selected to study the variability of MSLA. In general, MSLA variabilities of Indonesian waters had a seasonal pattern, positively correlated with the SOI index, and negatively correlated with DIM and PDO indexes. The partial correlation of DIM was more dominant in west of Sumatra ( $r=-0.52$ ) and south of Java ( $r=-0.44$ ), PDO was more dominant in the northern waters of Papua ( $r=-0.37$ ) and Makassar Strait ( $r=-0.33$ ), and SOI was more dominant in northern Papua ( $r=0.52$ ) and less toward the west of Indonesian waters. Overall, the MSLA variability of Indonesian waters can be explained by the variabilities of SOI, DIM, and PDO indexes with the lowest value in Natuna waters by 12% ( $R^2=0.12$ ) and the highest value in the northern waters of Papua by 54% ( $R^2=0.54$ ). Interannual variabilities were observed during ENSO events ( $SOI<-10$ ) along with the maximum value of DIM index resulted in the lowest value of MSLA. Meanwhile, the highest value of MSLA was found during La Nina events ( $SOI>10$ ) in conjunction with a minimum value of DIM and PDO indexes. The average rate of sea level rise in Indonesian waters was 5.84 mm/yr, almost two times higher than the average rate of global sea level rise (3.2 mm/yr).*

**Keywords:** mean sea level, anomaly, SOI, DIM, PDO, interannual, ENSO

#### ABSTRAK

Trend kenaikan paras laut yang terjadi sebagai akibat pemanasan global dapat menjadi ancaman bagi pulau-pulau kecil dan daerah pesisir di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan laju dan variabilitas anomali paras laut rata-rata (MSLA) di perairan Indonesia selama 20 tahun pengamatan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data MSLA bulanan yang diperoleh dari AVISO website (<ftp://ftp.aviso.oceanobs.com>). Data pendukung seperti *Southern Oscillation Index* (SOI) (<http://www.gom.gov.au/climate/enso>), *Dipole Indian Mode* (DIM) index ([http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_Indian\\_Ocean\\_Dipole.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_Indian_Ocean_Dipole.html)), dan *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) index (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/>). Delapan stasiun pengamatan ditentukan untuk mewakili perairan Indonesia. Secara umum variabilitas MSLA di perairan Indonesia mengikuti pola musiman, berkorelasi positif dengan SOI index, dan berkorelasi negatif dengan DIM dan PDO indeks. Korelasi parsial DIM lebih dominan di perairan barat Sumatra ( $r=-0,52$ ) dan selatan Jawa ( $r=-0,44$ ), PDO lebih dominan di perairan utara Papua ( $r=-0,37$ ) dan Selat Makassar ( $r=-0,33$ ), dan SOI paling dominan di perairan utara Papua ( $r=0,52$ ) dan semakin kecil ke arah perairan Indonesia bagian barat. Secara keseluruhan, variabilitas MSLA di perairan Indonesia dapat dijelaskan oleh variabilitas SOI, DIM, dan PDO indeks paling rendah di perairan Natuna sebesar 12% ( $R^2=0,12$ ) dan paling tinggi di perairan utara Papua sebesar 54% ( $R^2=0,54$ ). Variabilitas *interannual* disebabkan kejadian ENSO ( $SOI<-10$ ) bersamaan dengan nilai DIM maksimum yang menghasilkan MSLA terendah, dan saat La Nina ( $SOI>10$ ) bersamaan dengan nilai DIM dan PDO minimum menyebabkan MSLA tertinggi. Laju rata-rata kenaikan paras laut di seluruh perairan Indonesia adalah 5,84 mm/thn dan nilai ini hampir dua kali lebih tinggi dari laju rata-rata kenaikan paras laut global (3,2 mm/thn).

**Kata kunci:** paras laut, anomali, SOI, DIM, PDO, interannual, ENSO

## I. PENDAHULUAN

Trend peningkatan gas CO<sub>2</sub> yang diukur di Mauna Loa, Hawaii dan Kutub Selatan diikuti dengan trend peningkatan suhu permukaan global yang telah meningkat sebanyak 0,5°C sejak tahun 1970 dan trend peningkatan paras laut (IPCC, 2013, 2007; NOAA-ESRL, 2009). Berdasarkan pengamatan dari data satelit sekitar 20 tahun, trend positif terhadap peningkatan suhu permukaan laut juga dapat ditemui di perairan Indonesia (Nababan dan Gaol, 2010). Trend kenaikan suhu global dan suhu permukaan laut Indonesia dapat mengakibatkan kenaikan paras laut di Indonesia akibat pemuaihan (ekspansi termal) air laut, mencairnya gletser dan lapisan es, serta menipisnya massa es di Greenland dan Antartika (IPCC, 2013, 2007; Strassburg *et al.*, 2015).

Selama abad ke-21, Kajian Keempat IPCC memproyeksikan bahwa pada ekspansi termal akan menyebabkan kenaikan permukaan laut sekitar 17-28 cm ± sekitar 50%. Model proyeksi ini kurang dari banyak perkiraan hasil ekstrapolasi linier dari selama dekade pertama abad ke-21 (IPCC, 2007). Berdasarkan Kajian Keempat IPCC, pada paruh kedua abad ke-20, mencairnya gletser dan lapisan es di Antartika dan Artik dapat menyebabkan kenaikan paras laut sekitar 2,5 cm. Untuk abad ke-21, Kajian Keempat IPCC diproyeksikan bahwa mencairnya gletser dan lapisan es akan memberikan kontribusi sekitar 10-12 cm untuk kenaikan paras laut. Proses ketiga yang dapat menyebabkan permukaan air laut naik adalah mencairnya massa es dari Greenland dan Antartika. Hasil simulasi model untuk abad ke-21, IPCC melaporkan bahwa perkiraan sentral memproyeksikan bahwa Greenland akan mendorong sekitar 2 cm kenaikan paras laut.

Kenaikan paras laut dapat berdampak negatif terhadap wilayah Indonesia mengingat Indonesia memiliki banyak pulau-pulau kecil dan daerah pesisir yang sangat rentan terhadap ekspansi termal air laut. *International Panel on Climate Change* (IPCC) mem-

perkirakan bahwa tingkat rata-rata kenaikan paras muka laut global naik antara 0,18 dan 0,59 m pada abad berikutnya (IPCC, 2007). Selain itu, IPCC (2007) memperkirakan bahwa pada tahun 2080, kenaikan permukaan laut bisa mengkonversi sebanyak 33 persen dari lahan basah pesisir di dunia menjadi lautan.

Banyak penelitian memperkirakan kenaikan paras laut dengan menggunakan data pasut dengan hasil yang bervariasi antara 1 sampai 2 mm/tahun (Douglas, 1991, Peltier dan Tushingham, 1989; Trupin dan Wahr, 1990). Perbedaan hasil estimasi ini sebagai akibat dari variabilitas data pasut dan kelangkaan stasiun pasut, sebagai akibat dari variasi antar dasawarsa paras laut, dan pergerakan kerak bumi vertikal (Douglas, 1997). Kelemahan estimasi kenaikan paras laut berdasarkan kelangkaan data pasut dapat diatasi dengan menggunakan data satelit altimeter yang lebih independen dan akurat karena satelit ini dapat merekam data dalam waktu singkat, cakupan luas, berulang, dan sinoptik. Khusus untuk wilayah Indonesia yang memiliki banyak pulau-pulau kecil dan sangat rentan terhadap dampak kenaikan paras laut, monitoring terhadap perubahan paras laut menjadi satu hal yang sangat penting dilakukan dan monitoring ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan data satelit altimeter yang ada.

Satelit gelombang mikro (*microwave*) altimeter yang diluncurkan pertama kali pada tahun 1991 dirancang dan dikembangkan untuk mengukur topografi (naik/turun) permukaan laut secara global dan berulang. Setelah peluncuran seri pertama dari ERS-1 dan TOPEX/POSEIDON satelit pada tahun 1991 dan 1992, seri berikutnya terus diluncurkan seperti ERS-2, Geosat, Envisat, Jason-1, OSTM/Jason2, CryoSat, dan sebagainya. Satelit *microwave altimeter* ini telah berhasil membuktikan sebagai alat pemantauan global untuk paras laut, perobahan tutupan es, sirkulasi laut, dan meningkatkan pengetahuan dan pemahaman tentang peran laut dalam perubahan iklim. Satelit altimeter juga telah

terbukti sangat sukses untuk observasi pada laut dalam (*offshore*), domain yang pada awalnya dirancang (Evans *et al.*, 2005; Leben and Powel, 2003; Carton and Chao, 1999; Legresy and Remy, 1997; Leben and Born, 1993). Untuk laut dalam, satelit micro-wave altimeter modern dapat mengukur paras laut seketika dengan tingkat akurasi sekitar 4,1 cm (Yang *et al.*, 2008).

Beberapa penelitian terkait perubahan paras laut di Indonesia menggunakan data citra satelit telah dilaporkan seperti Saidy and Aziz (2009), BAPPENAS (2010). Berdasarkan data satelit dan pasut, Gaol *et al.* (2012) melaporkan kenaikan paras laut di perairan Sibolga berturut-turut 4,66 dan 3,96 mm/thn, perairan Jakarta berturut-turut 5,3 dan 2,3 mm/thn, dan perairan Cilacap berturut-turut 4,1 dan 4,2 mm/thn. Namun penelitian tersebut umumnya dilakukan dalam jangka waktu yang relatif singkat dan belum mewakili secara keseluruhan perairan Indonesia. Untuk itu, penelitian dinamika anomali paras laut di perairan Indonesia dengan menggunakan data satelit dengan jangka waktu yang lebih panjang dan mengambil titik pengamatan yang dapat mewakili seluruh perairan Indonesia sangat penting dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan laju dan variabilitas anomali paras laut yang terjadi di perairan Indonesia selama kurun waktu 20 tahun serta mempelajari faktor yang mempengaruhi variabilitas paras laut tersebut.

## II. METODE PENELITIAN

### 2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan (ekstraksi) data satelit altimeter mewakili perairan Indonesia diambil dari 8 stasiun yaitu: (1) perairan bagian barat Sumatra dengan pusat koordinat pada 0.09°LS dan 97.33°BT, (2) perairan bagian selatan Jawa dengan pusat koordinat pada 8.72°LS dan 108.33°BT, (3) perairan bagian selatan Bali dengan pusat koordinat pada 10.04°LS dan 115.33°BT, (4) perairan bagian utara Jawa dengan pusat koordinat pada 5.08°LS dan 11°BT, (5) perairan Laut

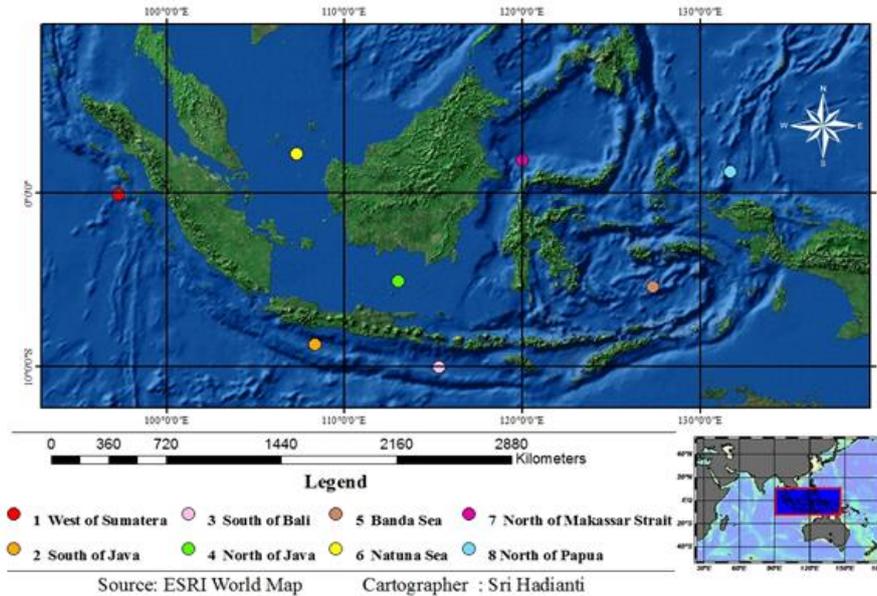
Natuna dengan pusat koordinat yaitu pada 2.24°LU dan 107.33°, (6) perairan bagian utara Selat Makasar dengan pusat koordinat pada 1.91°LU dan 120.00°BT, (7) perairan Laut Banda dengan koordinat 5.42°LS dan 127.33°BT, dan (8) perairan laut Utara Papua dengan pusat koordinat pada 1.24°LU dan 131.67°BT (Gambar 1).

### 2.2. Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data anomaly paras laut bulanan dalam format Network Common Data Form (NetCDF) diperoleh dari AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*) website (<ftp://ftp.aviso.oceanobs.com>) sistem DUACS (*Data Unification and Altimeter Combination System*) komponen *Delayed Time* (DT) rangkain *reference data* (Ref) dengan tipe data *Map of Sea Level Anomaly* (MSLA) selama 20 tahun (Oktober 1992- April 2012).

DUACS merupakan data hasil olahan dari semua satelit Altimetri seperti Cryosat-2, OSTM/Jason-2, Jason-2, Topex /Poseidon, Envisat, GFO, ERS-1, ERS-2 dan Geosat (CNES 2012). System DUACS dibuat dalam tiga komponen data yaitu *Real Time* data (RT), *Near Real Time* data (NRT), dan *Delayed Time* data (DT). Komponen DT mempunyai ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan komponen RT dan NRT mengingat komponen DT merupakan hasil gabungan dari semua satelit altimeter dengan periode waktu yang panjang dan merupakan database altimeter yang mudah digunakan pengguna serta data yang direkomendasikan oleh komunitas satelit altimeter (CNES, 2012).

Data pendukung yang digunakan dalam penelitian ini adalah data Southern Oscillation Index (SOI) yang diperoleh dari <http://www.gom.gov.au/climate/enso>, Dipole Indian Mode (DIM) index yang diperoleh dari [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_Indian\\_Ocean\\_Dipole.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_Indian_Ocean_Dipole.html), dan data *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) indeks yang didefinisikan sebagai komponen utama terkemuka dari variabilitas suhu permukaan air



Gambar 1. Lokasi ekstraksi data anomali paras laut satelit altimetry di perairan Indonesia.

laut bulanan di Lautan Pasifik Utara (Bond and Harrison, 2000; Mantua *et al.*, 1997) yang diakses dari *Nate Mantua's web site* (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/>). *Southern Oscillation Index* (SOI) memberikan indikasi mengenai pertumbuhan dan intensitas dari El Nino atau La Nina yang terjadi di Samudera Pasifik dan dihitung berdasarkan indeks perbedaan tekanan permukaan laut di Tahiti dan Darwin/Australia. Nilai  $SOI \leq -10$  umumnya menunjukkan kejadian El Nino dan  $>10$  menunjukkan kejadian La Nina (AGBM, 2013). *Dipole Indian Mode* (DIM) merupakan perbedaan suhu permukaan laut diantara dua wilayah (pole) yang disebut sebagai *dipole* yaitu wilayah barat pada perairan Arab (Samudra Hindia bagian barat) dan wilayah timur pada perairan selatan Indonesia (Samudra Hindia bagian timur). DIM mempengaruhi cuaca dan iklim wilayah Indonesia maupun Australia. Pada saat nilai DIM positif maksimum dan nilai SOI negatif minimum maka dampak El Nino di wilayah Indonesia dan Australia menjadi ekstrem (AGBM, 2013).

### 2.3. Analisis Data

Data MSLA yang diperoleh dari AVISO website diolah dengan menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV)

untuk membaca data dalam format NetCDF. Setelah itu dilakukan *Cropping* terhadap wilayah perairan Indonesia dan kemudian dilakukan ekspor data kedalam bentuk format txt. Dengan bantuan software Matlab, data dari 8 stasiun diperoleh dengan meratakan 9 titik point (grid) dari setiap stasiun (koordinat stasiun sebagai pusat data). Analisis regresi linear berganda untuk menentukan pengaruh faktor *Southern Oscillation Index* (SOI), *Dipole Indian Mode* (DIM) index, dan *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) index terhadap variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia dilakukan dengan menggunakan software Statistica v6.0.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Perairan Barat Sumatra, Selatan Jawa, dan Selatan Bali

Hasil dan pembahasan dinamika anomali paras laut untuk perairan barat Sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali dikelompokkan dalam satu group mengingat ketiga lokasi perairan ini berada pada lokasi yang berhubungan langsung dengan pengaruh Samudra Hindia sehingga diduga pola dan sifat dinamika anomali paras laut pada ketiga lokasi perairan ini memiliki pola yang sama. Secara umum, pola fluktuasi anomali paras laut di

perairan barat Sumatra dan selatan Jawa mengikuti pola yang relatif sama yaitu *semi-annual fluctuation* atau pola ganda minimum-maximum dalam setahun. Pada perairan barat Sumatra dan perairan selatan Jawa, nilai minimum pertama umumnya terjadi pada bulan Februari/Maret dan nilai maksimum pertama umumnya terjadi pada bulan Mei/Juni. Sedangkan nilai maksimum kedua (tertinggi dalam setahun) umumnya ditemui pada bulan November/Desember dan nilai minimum kedua (terendah dalam setahun) umumnya ditemui pada bulan Agustus/September setiap tahunnya (Gambar 2). Pada perairan selatan Bali, pola *semi-annual fluctuation* tidak terlihat dengan jelas melainkan didominasi oleh pola *annual fluctuation* (fluktuasi tahunan) dimana nilai anomali paras laut maksimum umumnya ditemui pada Januari/Desember dan nilai minimum umumnya ditemui pada bulan September/Oktobre (Gambar 2).

Khusus pada tahun-tahun El Nino Southern Oscillation (ENSO) dimana nilai SOI index  $< -10$  yang kejadiannya bersamaan dengan nilai maksimum dari DIM index, maka pada kejadian ini ditemui nilai anomali paras laut yang jauh lebih rendah (*extremely low*) dibandingkan dengan tahun-tahun sebelum dan sesudahnya (September 1994, Oktober 1997, dan September 2006). Sebaliknya, pada tahun-tahun La Nina kuat dimana nilai SOI index maksimum dan nilai DIM index negatif (Januari 1999, Februari 2008, dan Januari 2011) ditemui nilai anomali paras laut yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan tahun-tahun sebelum dan sesudahnya (Gambar 2).

Secara umum, pola fluktuasi anomali paras laut di perairan barat Sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali berkorelasi positif dengan SOI dan berkorelasi negatif dengan DIM dan PDO. Berdasarkan analisis regresi linier berganda, diperoleh bahwa sebesar 40%, 39%, dan 29% variabilitas anomali paras laut dapat dijelaskan oleh variabilitas SOI, DIM, dan PDO secara berturut-turut pada perairan barat Sumatra, selatan Jawa,

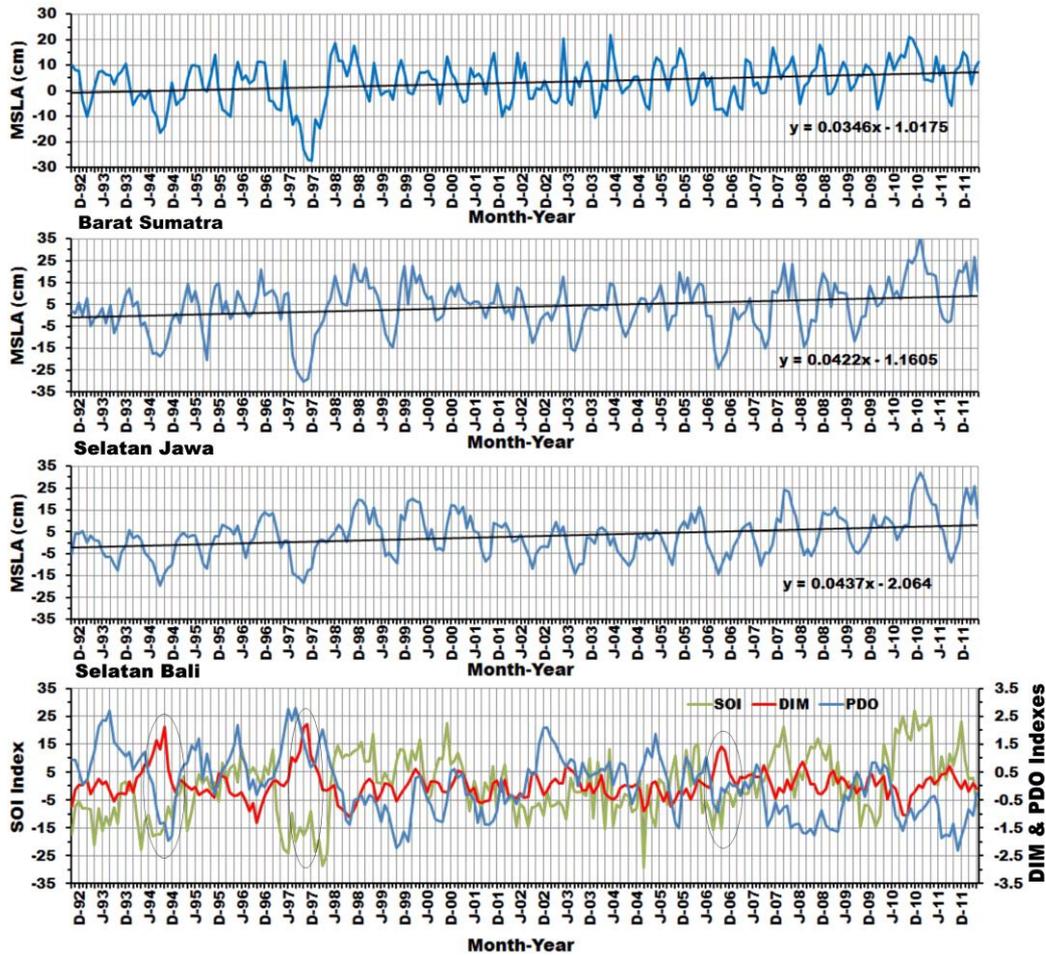
dan selatan Bali (Tabel 1). Berdasarkan nilai korelasi parsial ( $r$ ), diperoleh bahwa pengaruh SOI terhadap variabilitas anomali paras laut semakin besar pada lokasi perairan ke arah Indonesia bagian timur dimana nilai korelasi parsial pada perairan barat Sumatra ( $r=0,25$ ), perairan selatan Jawa ( $r=0,37$ ), dan perairan selatan Bali ( $r=0,44$ ). Sebaliknya, pengaruh DIM terhadap variabilitas anomali paras laut lebih kuat pada perairan barat Sumatra ( $r=-0,52$ ) dan semakin berkurang pada perairan selatan Jawa ( $r=-0,44$ ), dan perairan selatan Bali ( $r=-0,17$ ). Pada ketiga lokasi perairan ini, pengaruh PDO terhadap variabilitas anomali paras laut dinilai tidak nyata (Tabel 1).

Berdasarkan nilai rata-rata anomali paras laut (*mean sea level anomaly*), variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia secara umum memiliki nilai minimum  $-30,27$  cm (perairan selatan Jawa, Oktober 1997) dan maksimum  $+36,57$  cm (perairan selatan Jawa, Januari 2011) (Tabel 2). Secara umum, dinamika anomali paras laut di perairan barat Sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali mengalami peningkatan selama 20 tahun dengan nilai rata-rata pada kisaran 4,20 mm/tahun (barat Sumatra), 5,04 mm/tahun (selatan Jawa), dan 5,28 mm/tahun (selatan Bali) (Tabel 2, lihat Gambar 2).

### 3.2. Perairan Natuna dan Utara Jawa

Secara umum, pola fluktuasi anomali paras laut di perairan Natuna dan utara Jawa mengikuti pola yang relatif sama dan didominasi oleh fluktuasi musiman. Pada kedua perairan ini, nilai anomali paras laut minimum umumnya terjadi pada bulan Juli/Agustus pada perairan Natuna dan Agustus/September pada perairan utara Jawa. Sedangkan nilai maksimum umumnya ditemui pada bulan Desember/Januari (Gambar 3).

Berbeda dengan perairan yang berhubungan langsung dengan Samudra Hindia, pada kedua lokasi perairan ini, tidak terlihat adanya pengaruh yang nyata terhadap variabilitas MSLA dari kejadian iklim ekstrim seperti pada tahun ENSO (SOI $<-10$ ) bersamaan



Gambar 2. Fluktuasi dan trend MSLA di perairan barat Sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali serta fluktuasi SOI, DIM, dan PDO indeks. Garis elipse pada kurva bagian bawah menunjukkan periode ENSO bersamaan dengan nilai maksimum DIM yang berdampak pada nilai MSLA yang paling rendah. Keterangan pada x-axis: D-93=Desember-1993, J-93=Juni-1993.

Tabel 1. Nilai intersep, koefisien regresi, korelasi parsial, dan koefisien determinasi dari persamaan regresi linear berganda dimana MSLA sebagai peubah tak bebas (*dependent*) dan SOI, DIM, dan PDO indeks sebagai peubah bebas (*independent*).

No	Lokasi perairan	Intersep	Koefisien regresi			Korelasi parsial (r)			R <sup>2*</sup>
			SOI	DIM	PDO	SOI	DIM	PDO	
1	Barat Sumatra	3,44	0,247	-0,500	-0,065	0,25	-0,52	-0,07	0,40
2	Selatan Jawa	4,24	0,381	-0,400	-0,000	0,37	-0,44	-0,01	0,39
3	Selatan Bali	3,24	0,491	-0,150	-0,023	0,44	-0,17	-0,02	0,29
4	Utara Jawa	3,82	0,402	-0,150	-0,170	0,37	-0,17	-0,17	0,32
5	Natuna	2,79	0,201	-0,040	-0,190	0,17	-0,04	-0,17	0,12
6	Selat Makassar	4,53	0,453	-0,100	-0,340	0,45	-0,10	-0,33	0,51
7	Banda	4,62	0,528	-0,060	-0,110	0,48	-0,07	-0,12	0,37
8	Utara Papua	4,64	0,501	-0,070	-0,320	0,52	-0,09	-0,37	0,54

\*Koefisien determinasi.

Tabel 2. Nilai minimum, maximum, dan rata-rata anomali paras laut di perairan Indonesia.

No.	Lokasi	Min (cm)	Maks (cm)	Rata-rata (cm)	Laju kenaikan (cm/bln)	Laju kenaikan (mm/thn)
1	Barat Sumatra	-27,20 (Des-97)	21,70 (Mei-04)	3,06	0,035	4,20
2	Selatan Jawa	-30,27 (Okt-97)	36,57 (Jan-11)	3,82	0,042	5,04
3	Selatan Bali	-19,79 (Sep-94)	31,99 (Jan-11)	3,09	0,044	5,28
4	Utara Jawa	-14,84 (Agu-97)	25,13 (Jan-12)	3,67	0,049	5,88
5	Laut Natuna	-14,42 (Agu-04)	29,14 (Des-11)	2,72	0,030	3,60
6	Selat Makassar	-14,28 (Nov-97)	25,49 (Jan-11)	4,41	0,056	6,72
7	Laut Banda	-18,61 (Nov-97)	27,92 (Apr-11)	4,52	0,068	8,16
8	Utara Papua	-19,71 (Jan-98)	22,24 (Mar-08)	4,52	0,065	7,80
	Rata-rata	-19,89	27,53	3,72	0,049	5,84

bersamaan dengan nilai maksimum dari DIM index (Gambar 3). Demikian juga, pada tahun-tahun La Nina kuat (SOI>10) bersamaan dengan nilai DIM index negatif (Januari 1999, Februari 2008, dan Januari 2011), tidak ditemui pengaruh nyata terhadap nilai positif MSLA (Gambar 3).

Secara umum, pola fluktuasi anomali paras laut di perairan Natuna dan utara Jawa berkorelasi positif dengan SOI dan berkorelasi negatif dengan DIM dan PDO (lihat Tabel 1). Akan tetapi, nilai korelasi parsial dari SOI, DIM, dan PDO terhadap anomali paras laut pada kedua lokasi perairan ini bernilai relatif kecil kecuali pada perairan utara Jawa masih terlihat pengaruh parsial SOI terhadap variabilitas anomali paras laut sebesar 37% (lihat Tabel 1). Berdasarkan analisis regresi linier berganda, diperoleh bahwa variabilitas anomali paras laut di perairan utara Jawa dan Natuna secara berturut-turut dipengaruhi oleh variabilitas SOI, DIM, dan PDO sebesar 32% dan 12% (lihat Tabel 1).

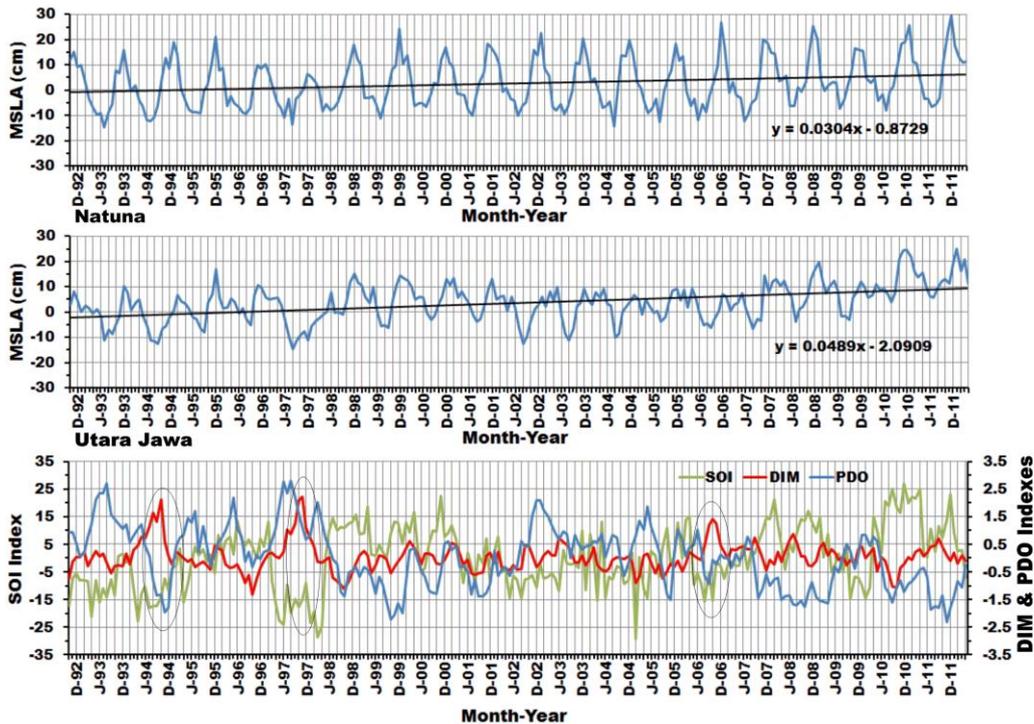
Berdasarkan nilai rata-rata anomali paras laut (*mean sea level anomaly*), variabilitas anomali paras laut di perairan utara Jawa dan Natuna memiliki nilai minimum -14,42 cm (perairan Natuna, Agustus 2004) dan maksimum +29,41 cm (perairan Natuna, Desember 2011) (lihat Tabel 2). Secara umum, dinamika anomali paras laut selama 20 tahun pengamatan di kedua lokasi perairan ini menunjukkan trend positif de-

ngan nilai rata-rata 5,88 mm/tahun (utara Jawa) dan 3,60 mm/tahun (Natuna) (lihat Tabel 2 dan Gambar 3).

### 3.3. Perairan Utara Selat Makassar, Banda, dan Utara Papua

Pola fluktuasi musiman anomali paras laut terlihat di perairan utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua dimana pola ini lebih jelas terlihat di Laut Banda diban-dingkan di perairan utara Selat Makassar dan utara Papua (Gambar 4). Pada perairan Laut Banda, nilai minimum umumnya terjadi pada bulan Juli/Agustus dan juga nilai maximum umumnya terjadi pada bulan Februari/Maret. Sedangkan di perairan utara Selat Makassar dan utara Papua, periode nilai maksimum dan nilai minimum anomali paras laut setiap tahunnya terlihat tidak teratur dimana nilai maksimum dapat ditemui pada bulan Januari-Mei sedangkan nilai minimum dapat ditemui pada bulan Agustus/September dan Januari/Februari/Maret. Fluktuasi antar tahun (*inter-annual*) terlihat sangat jelas pada perairan utara Papua dibandingkan dengan perairan utara Selat Makassar dan Laut Banda. Faktor ENSO dan PDO kelihatannya menjadi faktor utama dalam menentukan variabilitas anomali paras laut di lokasi ini (Gambar 4).

Berbeda dengan di perairan barat Sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali, pada perairan bagian timur Indonesia ini (utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua



Gambar 3. Fluktuasi dan trend anomali paras laut di perairan Natuna dan utara Jawa serta fluktuasi SOI, DIM, dan PDO indeks. Garis elipse pada kurva bagian bawah menunjukkan periode ENSO bersamaan dengan nilai maksimum DMI yang tidak secara nyata berdampak pada nilai anomali paras laut. Keterangan pada x-axis: D-93=Desember-1993, J-93=Juni-1993.

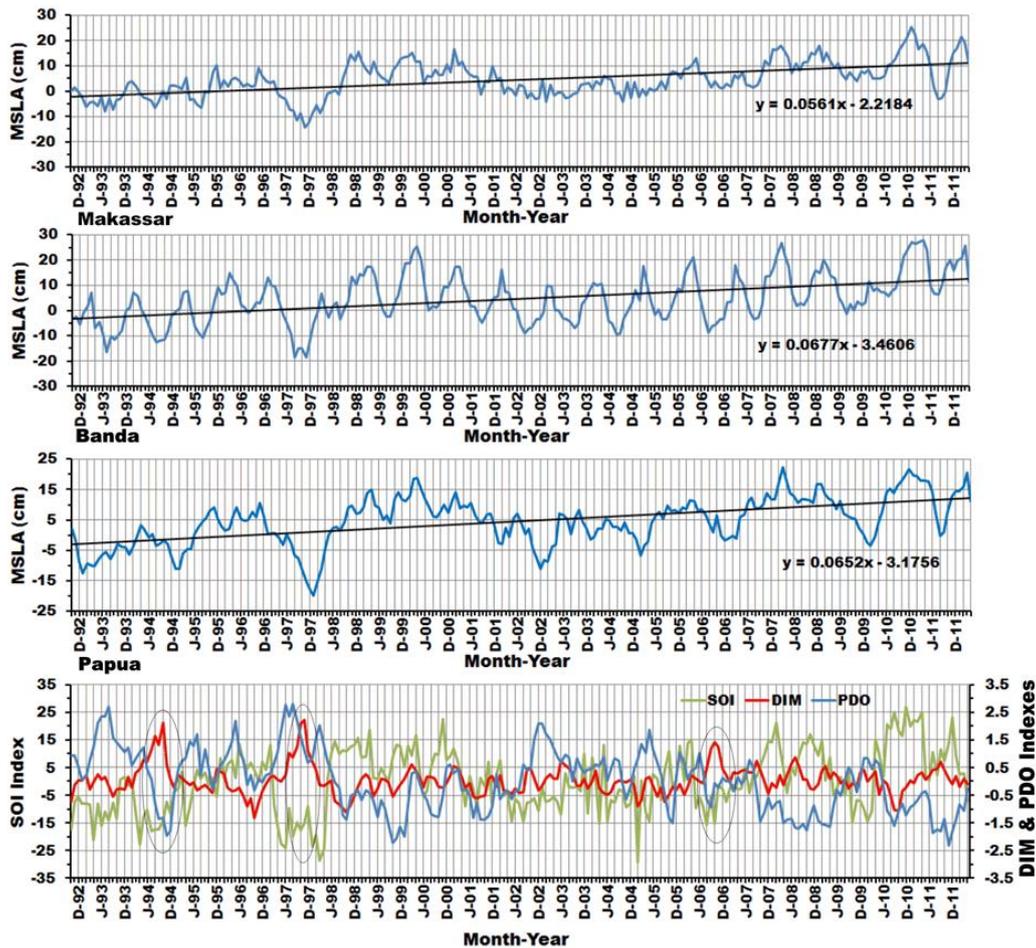
unsur DIM merupakan unsur yang paling lemah dalam menentukan variabilitas anomali paras laut ( $r=-0,07$  s/d  $-0,10$ ). Pada ketiga lokasi ini, faktor ENSO merupakan faktor yang paling dominan ( $r=0,45$  s/d  $0,52$ ). Sedangkan faktor PDO, secara parsial berkontribusi cukup nyata terhadap variabilitas anomali paras laut pada perairan utara Selat Makassar ( $r=-0,33$ ) dan utara Papua ( $r=-0,37$ ) (lihat Tabel 1).

Secara umum, pola fluktuasi anomali paras laut di perairan utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua berkorelasi positif dengan SOI dan berkorelasi negatif dengan DIM dan PDO. Berdasarkan analisis regresi linier berganda, diperoleh bahwa sebesar 51%, 37%, dan 54% variabilitas anomali paras laut dapat dijelaskan oleh variabilitas SOI, DIM, dan PDO secara berturut-turut pada perairan utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua (lihat Tabel 1).

Berdasarkan nilai rata-rata anomali paras laut, variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia bagian timur secara umum memiliki nilai minimum  $-14,28$  cm (perairan utara Selat Makassar, November 1997) dan maksimum  $+27,92$  (perairan Laut Banda, Apr-11) (lihat Tabel 2). Secara umum, laju kenaikan paras laut di perairan Indonesia bagian timur selama 20 tahun pengamatan berada pada kisaran  $6,72$  mm/tahun (utara Selat Makassar),  $8,16$  mm/tahun (Laut Banda), dan  $7,80$  mm/tahun (utara Papua) (lihat Tabel 2, Gambar 4). Secara umum, laju kenaikan paras laut rata-rata untuk seluruh perairan Indonesia adalah  $5,84$  mm/tahun (lihat Tabel 2).

### 3.4. Pembahasan

Variabilitas anomali paras laut secara umum dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu variabilitas jangka pendek dan jangka



Gambar 4. Fluktuasi dan trend anomali paras laut di perairan utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua serta fluktuasi SOI, DIM, dan PDO indeks. Garis elipse pada kurva bagian bawah menunjukkan periode ENSO bersamaan dengan nilai maksimum DMI yang tidak secara nyata berdampak pada nilai anomali paras laut. Keterangan pada x-axis: D-93=Desember-1993, J-93=Juni-1993.

pendek dipengaruhi oleh variabilitas aksi *wind stress* pada permukaan laut, gelombang, pasut, dan kondisi cuaca ekstrim seperti hujan badai (*tropical storm*) di daerah pesisir dan *hurricane*. Sedangkan variabilitas anomali paras laut jangka panjang pada berbagai periode waktu mulai dari bulanan, tahunan, puluhan tahun, dan trend dipengaruhi oleh perubahan dalam sirkulasi air laut, perubahan antropogenik seperti pengerukan, pergerakan tanah vertikal (*uplift and subsidence*), perubahan iklim musiman, perubahan suhu global, perubahan tutupan es dan gletser, dan perubahan dalam interaksi atmosfer-lautan seperti ENSO, DIM, dan PDO (Strassburg *et*

*al.*, 2015; Hamlington *et al.*, 2013; IPCC, 2013, 2007; Hu and Deser, 2013; Bond and Harrison. 2000; Saji *et al.*, 1999). Mengingat data yang dianalisa dalam paper ini adalah anomali paras laut rata-rata bulanan, maka faktor penyebab variabilitas anomali paras laut jangka pendek seperti aksi *wind stress* pada permukaan air laut, gelombang, pasut, dan kondisi cuaca ekstrim tidak dibahas dalam paper ini. Faktor musim, ENSO, DIM, dan PDO yang merupakan faktor interaksi pada atmosfer-lautan yang mempengaruhi variabilitas anomali paras laut jangka panjang akan dibahas lebih detail dalam paper ini.

Secara umum, variabilitas paras laut di perairan Indonesia khususnya perairan yang terletak di bagian barat Indonesia (perairan barat Sumatra, selatan Jawa, selatan Bali, utara Jawa, dan Natuna) secara nyata dipengaruhi oleh faktor musim dimana nilai minimum terjadi pada musim timur (musim kemarau, Agustus/September) dan maksimum terjadi pada musim barat (musim hujan, Desember/Januari) (lihat Gambar 2 dan 4). Kondisi seperti ini dapat diduga akibat pengaruh lokal seperti peningkatan volume air laut lokal sebagai akibat dari *river runoff* dan *regional vertical movement* massa air laut serta sirkulasi massa air musiman (Thomson *et al.*, 2008). Pada perairan di bagian timur Indonesia (perairan utara Selat Makassar, Laut Banda, dan utara Papua), faktor musim juga terlihat berpengaruh dalam variabilitas anomali paras laut dimana nilai minimum umumnya ditemui pada musim timur (musim kemarau, Juli/Agustus/September) sedangkan nilai maksimum dapat ditemui pada musim barat (musim penghujan, November/Desember/Januari/Februari) dan musim peralihan pertama (Maret/April/Mei).

Secara umum, variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia berkorelasi positif dengan indeks SOI dan berkorelasi negatif dengan indeks DIM dan PDO. Pengaruh DMI terhadap variabilitas anomali paras laut lebih dominan di perairan yang berhubungan langsung dengan Samudra Hindia seperti perairan barat Sumatra ( $r=-0,52$ ) dan selatan Jawa ( $r=-0,44$ ). Pengaruh DIM terhadap variabilitas anomali paras laut semakin menurun sampai tidak nyata pada perairan yang tidak berhubungan langsung dengan Samudra Hindia (Natuna, utara Jawa, Banda, utara Selat Makassar, dan utara Papua).

*Dipole Indian Mode* (DIM) diukur dari perbedaan suhu permukaan laut di daerah Samudera Hindia bagian Barat sekitar equator dan Samudera Hindia bagian timur di sebelah barat Sumatra dan selatan pulau Jawa (Saji *et al.*, 1999). Pada saat tekanan tinggi (suhu permukaan laut rendah) terjadi di

Samudera Hindia bagian timur (bagian barat Sumatra dan selatan Jawa) atau DIM bernilai positif, hal ini akan mengakibatkan aliran massa udara yang berhembus ke barat. Hembusan angin ini akan mendorong massa air di depannya dan mengakibatkan kekosongan massa air dibelakangnya sehingga untuk mencapai keseimbangan maka massa air yang relatif dingin dari kolom air yang lebih dalam akan terangkat ke permukaan yang mengakibatkan suhu permukaan laut di sekitar pantai selatan Jawa dan pantai barat Sumatra mengalami penurunan yang cukup drastis (anomali negatif rata-rata sebesar 2 derajat Celsius) (Saji *et al.*, 1999; Iskandar *et al.*, 2005). Aliran massa udara ke arah barat dan penumpukan massa air di bagian barat Samudera Hindia ini merupakan gejala fisik utama yang mengendalikan fenomena *Dipole Indian Mode*. Gejala ini akan menimbulkan gelombang Kelvin sepanjang equator yang bergerak ke arah timur (berlawanan dengan arah angin). Gelombang ini pada gilirannya mengangkat lapisan termoklin (lapisan air yang merupakan batas antara massa air yang lebih hangat di bawah permukaan laut dengan air yang lebih dingin di bawahnya) di bagian Timur Samudera Hindia (selatan Jawa dan barat Sumatra). Pada saat termoklin terangkat, suhu permukaan air laut dan paras laut menurun. Sebaliknya, di sisi barat, gelombang ini akan menekan termoklin masuk lebih dalam dan mengakibatkan suhu permukaan air laut dan paras laut meningkat. Hal yang sebaliknya terjadi pada saat DIM bernilai negatif, maka suhu permukaan air laut dan paras laut di bagian timur Samudera Hindia (pantai barat Sumatra dan selatan Jawa) akan mengalami penurunan (Askok *et al.*, 2001; Iskandar *et al.*, 2005).

Variabilitas SOI indeks berkorelasi positif terhadap variabilitas anomali paras laut di seluruh perairan Indonesia dimana nilai terkecil ditemui pada perairan Natuna ( $r=0,17$ ) dan perairan barat Sumatra ( $r=0,25$ ) serta semakin meningkat ke arah perairan Indonesia bagian timur (tertinggi pada perairan utara Papua,  $r=0,52$ ) (lihat Tabel 2).

Hal ini terjadi karena fenomena ENSO dan La Nina terjadi akibat perubahan interaksi atmosfer-lautan di Samudera Pasifik sehingga pengaruhnya terlihat lebih nyata pada perairan utara Papua yang berhubungan langsung dengan Samudera Pasifik. *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) merupakan fenomena alam anomali yang muncul akibat perbedaan tekanan udara  $\leq -10$  di Samudera Pasifik bagian timur (Tahiti) dan Australia bagian utara (Darwin) yang umumnya mengakibatkan kekeringan di wilayah Indonesia. Selaiknya, *La Nina* terjadi pada saat perbedaan tekanan udara di Samudera Pasifik bagian timur (Tahiti) dan Australia bagian utara (Darwin)  $> 10$  dan umumnya mengakibatkan banyak hujan di Indonesia (AGBM, 2013).

Kejadian ENSO (SOI $<-10$ ) umumnya menghasilkan angin timuran yang lebih lemah dari pada kondisi normal dan menyebabkan penurunan kedalaman termoklin sepanjang perairan Pasifik bagian barat sampai ke bagian tengah perairan Pasifik dan sebaliknya mengakibatkan kenaikan kedalaman termoklin di bagian timur perairan Pasifik. Penurunan lapisan termoklin di bagian barat perairan Pasifik ini mengakibatkan penurunan paras laut di sekitar perairan Pasifik bagian barat dan perairan Indonesia. Hal sebaliknya, pada kejadian *La Nina* (SOI $>10$ ), lapisan termoklin di bagian barat perairan Pasifik dan perairan utara Papua akan terangkat dan menyebabkan kenaikan paras laut di daerah ini.

*Pacific Decadal Oscillation* (PDO) indeks yang didefinisikan sebagai komponen utama terkemuka dari variabilitas suhu permukaan laut bulanan di Lautan Pasifik Utara (Bond and Harrison, 2000; Mantua *et al.*, 1997) memberikan pengaruh yang kecil terhadap variabilitas anomali paras laut pada perairan Laut Banda ( $r=-0,12$ ), perairan Natuna ( $r=-0,17$ ), perairan utara Jawa ( $r=-0,17$ ) dan semakin besar pengaruhnya pada perairan utara Selat Makassar ( $r=-0,33$ ) dan perairan utara Papua ( $r=-0,37$ ) (lihat Tabel 2). Besar kecilnya pengaruh PDO terhadap vari-

abilitas anomali paras laut di perairan Indonesia terkait dengan lokasi perairan dengan sirkulasi air laut dari Samudera Pasifik. Sebaliknya, pengaruh PDO terhadap variabilitas anomali paras laut di perairan barat Sumatera, selatan Jawa, dan selatan Bali tidak terlihat nyata (sangat kecil). Hal ini mungkin terjadi karena pengaruh sirkulasi air laut dari Samudera Pasifik melalui *Indonesian Throughflow* di perairan ini cukup lemah.

Variabilitas anomali paras laut antar-tahunan (*interannual*) terlihat dengan jelas pada saat kejadian ENSO (SOI $<-10$ ) terjadi bersamaan dengan DIM maksimum seperti yang terjadi pada tahun-tahun ENSO dan DIM maksimum pada September 1994, Oktober 1997, dan September 2006 dimana pada bulan-tahun tersebut nilai anomali paras laut paling rendah dibandingkan tahun-tahun sebelum dan sesudahnya di seluruh perairan Indonesia (kecuali perairan Natuna). Fenomena DIM hampir mirip dengan dengan fenomena ENSO namun tidak bergantung satu sama lain (Saji *et al.*, 1999) dan korelasi DIM-ENSO tergantung pada evolusi kejadiannya yang ditunjukkan dari musim ke musim dan umumnya diperoleh korelasi yang kuat pada bulan September-Oktober (Godfrey *et al.*, 2001). Pada kejadian ENSO bersamaan dengan kejadian DIM maksimum, maka DIM akan menambah penurunan paras laut di perairan Indonesia khususnya di perairan Indonesia bagian barat sumatra, selatan Jawa, dan selatan Bali karena pada saat DIM positif, lapisan termoklin di bagian timur samudera Hindia menjadi terangkat yang mengakibatkan paras laut di wilayah ini menjadi menurun serta zona konveksi (zona hujan) bergeser ke arah barat yang mengakibatkan kekeringan di wilayah Indonesia (Saji *et al.*, 1999; Askok *et al.*, 2001; Iskandar *et al.*, 2005). Sebaliknya, nilai anomali paras laut paling tinggi dibandingkan dari tahun-tahun sebelum dan sesudahnya ditemui apabila kejadian *La Nina* (SOI $>10$ ) bersamaan dengan kejadian DIM dan PDO minimum seperti terjadi pada Februari 2000, Februari 2008, dan Desember 2010 (lihat

Gambar 2, 3, dan 4). Hal ini terjadi karena baik SOI, DIM, dan PDO akan bekerja bersama-sama menaikkan lapisan termoklin yang mengakibatkan kenaikan paras laut di perairan Indonesia (Saji *et al.*, 1999; Askok *et al.*, 2001; Iskandar *et al.*, 2005).

Secara umum, laju kenaikan paras laut di bagian timur perairan Indonesia (perairan utara selat Makassar=6,72 mm/tahun, laut Banda=8,16 mm/tahun, dan perairan utara Papua=7,80 mm/tahun) lebih besar dibandingkan dengan laju kenaikan paras laut di bagian barat dan tengah perairan Indonesia (barat Sumatra=4,20 mm/thn, selatan Jawa=5,04 mm/thn, selatan Bali=5,28 mm/thn, utara Jawa=5,88 mm/thn, dan laut Natuna=3,60 mm/thn) (lihat Tabel 2). Hal ini diduga disebabkan karena variabilitas kenaikan paras laut di bagian timur perairan Indonesia selain dipengaruhi oleh faktor musiman, interannual, dan dekadal juga dipengaruhi oleh *Pacific Decadal Oscillation* (Hamlington *et al.*, 2013). Laju kenaikan paras laut paling rendah terdapat di laut Natuna (3,60 mm/thn) (lihat Tabel 2) dan hal ini mungkin disebabkan karena variabilitas kenaikan paras laut disini umumnya hanya dipengaruhi oleh faktor musim dan lokal. Secara umum, rata-rata laju kenaikan paras laut di perairan Indonesia adalah 5,84 mm/thn dan nilai ini hampir dua kali lebih besar dibandingkan dengan laju rata-rata kenaikan paras laut global (3,2 mm/thn; (NOAA, 2013)). Hal ini mungkin disebabkan karena wilayah Indonesia merupakan wilayah pertemuan pertukaran massa air laut dari samudera Pasifik dan samudera Hindia serta pertemuan proses interaksi atmosfer-laut yang terjadi di antara kedua samudera tersebut. Bilamana kenaikan paras laut ini berlangsung secara linear dan berkelanjutan maka kehilangan pulau-pulau kecil dan penggenangan wilayah pantai dan dataran rendah di Indonesia tidak dapat dihindari. Untuk itu, upaya pengurangan laju kenaikan paras laut serta manajemen wilayah pesisir harus menjadi perhatian bagi semua pemangku kepentingan.

#### IV. KESIMPULAN

Secara umum variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia mengikuti pola musiman, berkorelasi positif dengan SOI indeks, dan berkorelasi negatif dengan DIM dan PDO indeks. Variabilitas *interannual* terlihat pada saat kejadian ENSO (SOI<-10) bersamaan dengan nilai DIM maksimum dan menyebabkan nilai anomali paras laut paling rendah. Sementara nilai anomali paras laut paling tinggi terjadi pada saat kejadian La Nina (SOI>10) terjadi bersamaan dengan nilai DIM dan PDO minimum.

Korelasi parsial SOI indeks terhadap variabilitas anomali paras laut di seluruh perairan Indonesia terlihat nyata dengan nilai korelasi parsial terendah ( $r=0,25$ ) di perairan barat Sumatra dan tertinggi ( $r=0,52$ ) di perairan utara Papua, korelasi parsial DIM indeks lebih dominan di perairan selatan Jawa ( $r=-0,44$ ) dan perairan barat Sumatra ( $r=-0,52$ ), dan korelasi parsial PDO indeks lebih dominan di perairan utara Selat Makassar ( $r=-0,33$ ) dan perairan utara Papua ( $r=-0,37$ ). Secara keseluruhan, variabilitas anomali paras laut di perairan Indonesia dapat dijelaskan oleh variabilitas SOI, DIM, dan PDO indeks dengan nilai paling rendah di perairan selatan Bali sebesar 29% ( $R^2=0,29$ ) dan paling tinggi di perairan utara Papua sebesar 54% ( $R^2=0,54$ ). Sedangkan untuk perairan Natuna, faktor SOI, DIM, dan PDO tidak berpengaruh secara nyata ( $R^2=0,12$ ) dan diduga di perairan ini variabilitas anomali paras laut cenderung dipengaruhi oleh faktor musim dan lokal.

Laju rata-rata kenaikan paras laut di seluruh perairan Indonesia adalah 5,84 mm/thn dan nilai ini hampir dua kali lebih tinggi dari laju rata-rata kenaikan paras laut global (3,2 mm/thn). Hal ini mengindikasikan bahwa dampak kenaikan paras laut ini sangat rentan terhadap penggenangan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil di Indonesia.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sebagian dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi melalui proyek penelitian BOPTN penelitian strategis IPB tahun 2014. Penulis mengucapkan terima kasih kepada para reviewer yang telah banyak memberi masukan dan komentar untuk memperbaiki tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ashok, K., Z. Guan, and T. Yamagata. 2001. Impact of the Indian ocean dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, 28:doi: 10.1029/2001GL013294.
- Australian Government Bureau of Meteorology (AGBM). 2013. Southern Oscillation Index. <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>. [Retrieved , 20 October 2014].
- BAPPENAS. 2010. Indonesian climate change sectoral (ICCSR) road map. National Development Planning Agency ICCSR ([www.bappenas.go.id](http://www.bappenas.go.id)).
- Bond, N.A. and D.E. Harrison. 2000. The Pacific decadal oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes. *Geophys. Res. Lett.*, 27(5):731-734.
- Carton, J.A. and Chao, Y. 1999. Caribbean sea eddies inferred from TOPEX/POSEIDON Altimetry and a 1/6° Atlantic ocean model simulation. *J. of Geophys. Res.*, 104(C4):7743-7752.
- [CNES] Centre National D'Etudes Spatiales. 2012. SSALTO/DUACS user handbook CLS-DOS-NT-06-034 - Issue 3.2. SALP-MU-P-EA-21065-CLS.
- Douglas, B.C. 1991. Global sea level rise. *J. of Geophys. Res.*, 96:6981-6992. Doi: 10.1029/91JC00064.
- Douglas, B.C. 1997. Global sea rise: a re-determination. *Surveys in Geophysics*, 18:279-292.
- Evans, D.L., W. Alpers, A. Cazenave, C. Elachi, T. Farr, *et al.* 2005. Seasat-a 25-year legacy of success, *Remote Sensing of Environment*, 94:384-404.
- Gaol, J.L., P. Manurung, B. Nababan, B.P. Pasaribu, D. Manurung, A. Wisak-santi, and R.E. Arhatin. 2012. Sea level rise derived satellite altimetry and tide gauge data and its impact on the coastal zone of Indonesia. Proceeding: 11th Biennial Conference of Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC), 05-09 November 2012, Kochi, Kerala, India.
- Godfrey, J.S., G.C. Johnson, M.J. McPhaden, G. Reverdin, and S. Wijffels. 2001. The tropical ocean circulation. *In: Church J, J. Gould, and G. Siedler (eds.)*. Ocean circulation and climate. Academic Press, London. 215-224pp.
- Hamlington, B.D., R.R. Leben, M.W. Strassburg, R.S. Nerem, and K.Y. Kim. 2013. Contribution of the Pacific decadal oscillation to global mean sea level trends. *Geophys. Res. Lett.*, 40(19):5171-5175.DOI:10.1002/grl.50950.
- Hu, A. and C. Deser. 2013. Uncertainty in future regional sea level rise due to internal climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 40:2768-2772, doi:10.1002/grl.50531.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers. *In: Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 28p.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the inter-governmental panel on climate change [Parry, Martin L., Canziani, Osvaldo

- F., Palutikof, Jean P., van der Linden, Paul J., and Hanson, Clair, E. (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1000p.
- Iskandar, I., W. Mardiansyah, Y. Masumoto, and T. Yamagata. 2005. Intraseasonal Kelvin waves along the southern coast of Sumatra and Java. *J. Geophys. Res.*, 110, C04013, doi:10.1029/2004JC002508.
- Leben R. and Born, G.H. 1993. Tracking Loop Current eddies with satellite altimetry, *Advances in Space Research*, 13(11), 325-333.
- Leben, R.R. and B.S. Powell. 2003. Accuracy assessment of Jason-1 and TOPEX/POSEIDON along-track sea surface slope. *Marine Geodesy*, 26(3-4):355-366.
- Legresy, B. and F. Remy. 1997. Surface characteristics of the Antarctic ice sheet and altimetric observations. *J. of Glaciology*, 43(114):197-206.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:1069-1079.
- Nababan, B. dan J. L. Gaol. 2010. Trend suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a serta dampaknya terhadap penyerapan CO<sub>2</sub> di perairan Indonesia. *J. Ilmu Kelautan*, 1(Edisi Khusus): 213-227.
- NOAA. 2013. Global mean sea level from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2. <http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/SeaLevelRise/>. [retrieved, 13 August 2013].
- Peltier, W.R. and A.M. Tushingham. 1989. Global sea level rise and the greenhouse effect-might they be connected? *Science*, 244:806-810. Doi: 10.1126/Science.244.4906.806.
- Saidy, A.R. and Y. Azis. 2009. Sea level rise in South Kalimantan, Indonesia: an economic analysis of adaptation strategies in agriculture. The Economy and Environment Program for Southeast Asia. Singapore.
- Saji, N.H., B.N. Goswami, P.N. Vinayachandran, and T. Yamagata. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401:360-363.
- Strassburg, M.W., B.D. Hamlington, R.R. Leben, P. Manurung, J. Lumban Gaol, B. Nababan, S. Vignudelli, and K.Y. Kim. 2015. Sea level trends in Southeast Asian seas. *Clim. Past*, 11:743-750.
- Thomson, R.E., B.D. Bornhold, and S. Mazzotti. 2008. An examination of the factors affecting relative and absolute sea level in coastal British Columbia. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 260:v+49p.
- Trupin, A. and J. Wahr. 1990. Spectroscopic analysis of global tidal gauge sea level data. *Geophys. J. Int.*, 100:441-453.
- Yang, L., Lin, M., Bai, Y., and Pan, D. 2008. Retracking Jason1 altimeter waveform over China. *Coastal Zone. Proc. of SPIE*, Vol. 7154 71540K-10. doi: 10.1117/12.804835.
- Diterima* : 25 April 2015  
*Direview* : 24 Mei 2015  
*Disetujui* : 4 Juni 2015