

# POLA SIRKULASI DAN VARIABILITAS ARUS DI PERAIRAN SELAT SUNDA

## CIRCULATION AND CURRENT VARIABILITY IN THE SUNDA STRAIT WATERS

Herwi Rahmawitri<sup>1)</sup>, Agus Saleh Atmadipoera<sup>2)</sup> Sri Suryo Sukoraharjo<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan, Dept. ITK FPIK IPB Bogor

<sup>2)</sup>Lab. Oseanografi Fisika, Dept. ITK, FPIK IPB Bogor

<sup>3)</sup>Balitbang Kelautan dan Perikanan Jakarta

E-mail: atmadipoera\_itk@ipb.ac.id

Diterima tanggal : 2 November 2016, diterima setelah perbaikan : 13 Februari 2017, disetujui tanggal 16 Februari 2017

### ABSTRAK

Selat Sunda sebagai penghubung antara Laut Jawa (LJ) di interior Laut Indonesia dengan Samudera Hindia (SH) di tepi luar Indonesia diduga berperan penting dalam menyalurkan signal dinamika laut yang terjadi di tepi SH ke dalam interior laut Indonesia, atau sebaliknya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji struktur dan variabilitas arus di kawasan perairan Selat Sunda (SS). Data deret-waktu hasil keluaran model sirkulasi umum laut resolusi-tinggi ( $1/12^\circ$ ) dari INDESO antara tahun 2007-2010 dianalisis untuk kajian di dalam makalah ini. Validasi model dengan data observasi satelit menunjukkan korelasi tinggi (0.76 dan 0.90) untuk lokasi *sampling box* di SH dan LJ. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tinggi muka laut di sisi LJ selalu lebih tinggi dari pada di sisi SH, kecuali pada periode bulan November-Januari dimana terjadi pembalikan aliran arus ke arah utara, yang diduga datangnya gelombang Kelvin dari ekuator SH. Intensifikasi arus kearah baratdaya di LJ terjadi di kedalaman 10-20 m, tetapi di SH terjadi di dekat permukaan dimana arusnya mengalir kearah tenggara. Variabilitas arus di kedua lokasi bervariasi dalam rentang skala-waktu intra-musiman, semi-annual, dan annual. Amplitudo spektrum densitas energi untuk komponen arus zonal lebih tinggi di kedua lokasi studi. Dalam skala-waktu intra-musiman, koherensi yang signifikan untuk komponen arus zonal di kedua lokasi terbentuk pada periodisitas 23-51 harian dengan fluktuasi arus di sisi SH mendahului dari arus di sisi LJ.

**Kata Kunci:** INDESO, Selat Sunda, analisis PSD, struktur vertikal dan variabilitas arus laut.

### ABSTRACT

*The Sunda Strait plays an important role for connecting the flow of Java Sea (JS) in the interior Indonesia Seas to the eastern Indian Ocean (IO). This means that the physical processes and ocean dynamics in IO side may be transmitted through this strait, or vice versa. The objectives of this study were to investigate the structure and variability of circulation in the Sunda Strait waters. Model output of high-resolution ( $1/12^\circ$ ) ocean general circulation model from INDESO project between 2007-2010 were analyzed in two areas, one location is in Java Sea (JS) and the other is in Indian Ocean (IO) side. Model of sea surface height (SSH) was validated with altimetry data, which shows a high correlation coefficient of 0.90 in the IO and 0.76 in JS. In general, both model and data indicate that SSH in JS is always much higher than that found in IO. However, between November-January each year, there exists frequently a reversal flow northward in Sunda Strait, which may be related to arrival of coastally trapped Kelvin waves. The structure of the flow in JS indicates the southwestward current is maximum at a depth of 10-20 meters. An intensification of near surface southeastward flow was found in IO side. Analysis of PSD showed that peaks of spectral energy varied from intra-seasonal, semiannual, to annual time-scales. The amplitude spectra of the energy density of the zonal flow component is much stronger than the meridional flow component in both two sites. On intra-seasonal scales, high coherency between zonal current in IO and in JS revealed on periods of 23-51 days, where current fluctuation in IO leads of about 2-3 days to current fluctuation in JS.*

**Keywords:** INDESO, Sunda Strait, PSD analysis, vertical structure and variability of current.

## PENDAHULUAN

Arus merupakan aliran massa air yang dapat disebabkan oleh tiupan angin, perbedaan densitas air laut, gelombang laut dan pasang surut (Nontji, 2005). Arah dan kekuatan arus di lapisan permukaan pada laut terbuka banyak ditentukan oleh angin. Angin yang berhembus di perairan Indonesia terutama adalah angin musim (*monsoon*) yang mengalami dua kali pembalikan arah dalam setahun yaitu Musim Barat dan Musim Timur. Sehingga mengakibatkan terbentuknya arus musim di beberapa perairan Indonesia seperti Laut Cina, Laut Jawa, Laut Flores sampai ke Laut Banda dan Laut Arafuru.

Secara geografis perairan Selat Sunda (SS) terletak di antara Pulau Sumatera dan Pulau Jawa. Perairan ini juga berhubungan langsung dengan Laut Jawa dan Samudera Hindia. Perairan selat bagian utara yang berhubungan dengan Laut Jawa memiliki kedalaman kurang dari 50 meter, tetapi pada bagian selatan yang berhubungan dengan Samudera Hindia kedalaman lautnya lebih dari 1000 meter (Minarto *et al.*, 2008). Menurut Wyrski (1961) pada bulan Juli – Oktober, Angin Muson Tenggara berhembus sangat kuat di Pantai Selatan Jawa dan Arus Khatulistiwa Selatan tertekan jauh ke utara, sehingga cabang Arus Khatulistiwa Selatan berbelok sampai ke Selat Sunda. Diantara bulan Mei sampai dengan bulan Agustus terjadi kenaikan massa air (*upwelling*) di Selatan Jawa – Sumbawa. Transpor massa air dari Laut Jawa ke Samudera Hindia yang melewati Selat Sunda terjadi secara kontinu sepanjang tahun dengan kuantitas yang kecil dan sangat erat hubungannya dengan gradien permukaan laut (*sea level*).

Pentingnya penelitian ini karena Selat Sunda merupakan salah satu selat yang menarik untuk dipelajari kondisi oseanografinya karena fungsinya sebagai penghubung Laut Jawa dan Samudera Hindia terutama yang berkaitan dengan pertukaran massa air. Manfaat lain yang diperoleh dari mengkaji arus diantaranya dapat digunakan sebagai informasi untuk pelayaran dan rencana pembangunan jembatan yang memotong perairan SS.

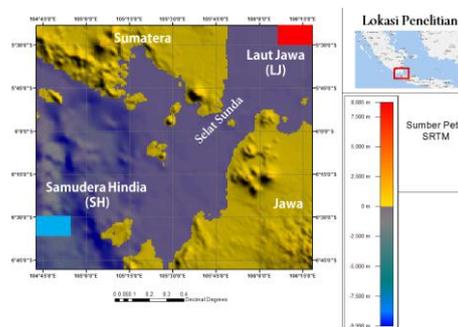
Pengukuran arus secara langsung di lapangan akan membutuhkan biaya yang besar karena arus

di lautan terjadi dalam skala ruang dan waktu yang besar. Oleh karena itu, perlu penelitian komplemen melalui kajian pemodelan yang berguna untuk memahami fenomena arus dalam skala ruang dan waktu yang besar namun biaya relatif kecil (Madec *et al.*, 1998). Salah satu metode yang bisa digunakan untuk menganalisis hasil model tersebut adalah metode analisis deret waktu. Informasi deret waktu didapat dengan menampilkan grafik variabel (komponen skalar dari deret vektor) terhadap waktu dimana skala waktu tergantung deret data yang akan ditampilkan (Emery dan Thomson, 1997). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pola sirkulasi laut di SS, struktur dan variabilitas arus di SS bagian selatan (sisi Samudera Hindia, SH) dan di SS bagian utara (sisi Laut Jawa, LJ), serta fenomena yang mempengaruhi kedua wilayah tersebut.

## BAHAN DAN METODE

### Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan mulai dari Maret 2013 - November 2013 dengan melakukan pengolahan dan analisis data hasil model arus INDESO dan data satelit altimetri. Lokasi pengolahan data mencakup wilayah perairan SS pada koordinat  $6^{\circ}34'8,4''\text{LS}$  -  $5^{\circ}11'16,8''\text{LS}$  dan  $103^{\circ}42'00''\text{BT}$  -  $107^{\circ}30'00''\text{BT}$  (Gambar 1). Di wilayah tersebut kemudian ditetapkan 2 lokasi *sampling box* untuk mengekstrak data deret-waktu dari keluaran model, di sisi LJ (kotak merah), serta di sisi SH (kotak biru-muda).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Selat Sundadan sekitarnya. Kotak merah dan biru-muda adalah *sampling box* di sisi LJ, dan di SH.

## Sumber Data Penelitian

Data penelitian terdiri dari data arus hasil keluaran simulasi model dan data Anomali Tinggi Muka Laut (*Sea Surface Height Anomaly* (SSHA)). Data yang digunakan dalam penelitian ini mulai dari 3 Januari 2007-12 Desember 2010. Berikut penjelasan masing-masing data.

Data arus merupakan data hasil keluaran rata-rata harian simulasi model sirkulasi laut yang dikembangkan oleh proyek *Infrastructure Development for Space Oceanography* (INDES0). Model yang digunakan merupakan simulasi Model Sirkulasi Umum Samudera (OGCM) 3-Dimensi dari sistem *Nucleus for European Modeling of the Ocean - Océan Parallélisé* (NEMO-OPA) (Madec *et al.*, 1998). NEMO-OPA merupakan model dinamika lautan. Data keluaran arus yang dibentuk berupa data grid yang mengikuti batas lateral global dengan resolusi horizontal  $1/12^\circ$  atau sekitar 9,25 km dan resolusi vertikal terdiri dari 50 level kedalaman serta gaya dorong atmosfer (*atmospheric forcings*) dari analisis operasional *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Dombrowsky *et al.*, 2012). Data kedalaman untuk wilayah LJ hanya mencapai 16 level kedalaman (0,5m -34,4 m), sedangkan untuk wilayah SH mencapai 35 level kedalaman (0,5m - 902,3 m). Untuk analisis temporal arus data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga level kedalaman untuk masing-masing wilayah yakni pada kedalaman 5,081 m, 15,81 m dan 29,44 m; sedangkan untuk analisis struktur menegak arus data yang digunakan adalah hasil rata-rata selama rentang waktu untuk setiap level kedalaman kedua wilayah.

Data SSHA yang digunakan berasal dari hasil satelit dan hasil keluaran simulasi model NEMO-OPA. Data hasil satelit didapat dari *Segment Sol Multimissions d'Altimétrie, d'Orbitographie et de localization precise* (SSALTO) *Data Unification and Altimetry Combination System* (DUACS). Data dapat diakses melalui situs <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/>.

Data input SSALTO DUACS merupakan gabungan produk altimetri dari beberapa satelit

seperti TOPEX, POSEIDON, ERS-2, GFO, Jason, dan ENVISAT (Le Traon dan Ogor, 1998; Ducet *et al.*, 2000). SSALTO DUACS merupakan data *Near Real-Time* yang dikembangkan dan dioperasikan oleh *Collecte Localisation Satellites* (CLS). Resolusi data ini adalah  $1/3^\circ$  atau sekitar 37 km.

## Pengolahan dan Analisis Data

Langkah awal pengolahan data adalah validasi hasil model (arus dan tinggi muka laut). Hal ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi model dengan mengetahui nilai korelasi antara model dan hasil observasi di lapangan (Stewart, 2003). Karena keterbatasan dari lapangan maka langkah validasi ini dilakukan melalui analisis korelasi SSHA hasil keluaran model dengan data SSHA dari SSALTO DUACS. Analisis korelasi SSHA ini dilakukan untuk data tinggi muka laut harian menggunakan perangkat lunak *MATLAB*.

Nilai koefisien korelasi ditentukan dengan persamaan berikut (Emery dan Thomson, 1997):

$$r = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} \quad (1)$$

dimana:

$r$  = Koefisien korelasi (dengan nilai antara -1 dan +1)

$N$  = Banyak data

$x_i, y_i$  = Nilai data x dan y ke-i

$\bar{x}, \bar{y}$  = Rata-rata x dan y

$s_x, s_y$  = Standar deviasi data

Selain menentukan nilai koefisien korelasi juga dihitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE merupakan suatu ukuran yang sering digunakan untuk menentukan perbedaan antara nilai-nilai yang diprediksi oleh model dengan nilai-nilai hasil dari satelit. Nilai RMSE dihitung dengan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{model,i} - x_{satelit,i})^2}{N}}$$

dimana

$RMSE$  = *Root Mean Square Error*

$x_{model,i}$  = Nilai data model ke-i

$x_{satelit,i}$  = Nilai data satelit ke-i

$N$  = Banyak data

Struktur arus ditampilkan dalam bentuk spasial berupa nilai rata-rata SSH dan vektor arus selama empat tahun untuk tiga level kedalaman (5 m, 15 m dan 29 m). Hal ini bertujuan untuk memperlihatkan secara umum arah arus pada wilayah penelitian. Selain itu dari gambar yang akan dihasilkan dapat dilihat besarnya kecepatan arus dari panjang vektor yang terbentuk. Tampilan ini dihasilkan oleh perangkat lunak *FERRET*.

Struktur menegak arus dianalisis dengan melihat rata-rata profil menegak arus harian dan standar deviasi kecepatan arus terhadap kedalaman untuk masing-masing komponen pada berbagai level kedalaman. Hal ini bertujuan untuk membandingkan rata-rata kecepatan arus pada bagian selatan dan utara dalam kurun waktu empat tahun. Profil menegak ini dihasilkan oleh perangkat lunak *FERRET*.

Nilai rata-rata untuk komponen zonal dan meridional ditentukan dengan persamaan (Emery dan Thomson, 1997):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Untuk menentukan nilai standar deviasi data digunakan persamaan:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$s = \sqrt{s^2}$$

dimana:

- $s^2$  = Varian
- $s$  = Standar deviasi
- $N$  = Banyak data
- $x_i$  = Nilai data x ke-i
- $\bar{x}$  = Rata-rata nilai x

Sebaran data arus ditampilkan dalam bentuk sebaran temporal berupa *stickplot* dan grafik masing-masing komponen zonal dan meridional. Hal ini bertujuan untuk memberikan gambaran fluktuasi secara umum data arus dalam domain waktu. Tampilan ini dihasilkan dari perangkat lunak *FERRET*. Data arus yang diolah dengan

perangkat ini berupa format file *netcdf*. Data ditapis (*filtered*) dengan metode *Hanning window* dengan pembobot 21 hari. Nilai negatif pada komponen zonal ( $u$ ) menunjukkan arah ke barat dan nilai positif menunjukkan arah ke timur. Pada komponen meridional ( $v$ ) nilai negatif menunjukkan arah ke selatan dan positif arah ke utara.

Analisis spektrum densitas energi (*power spectral density*, PSD) dilakukan untuk mengetahui nilai energi setiap sinyal arus per frekuensi. Pada umumnya, dari hasil PSD ini akan ditemukan satu atau lebih sinyal arus yang memiliki nilai energi yang relatif tinggi yang disebut dengan *energy peak*. Nilai *peak* ini menggambarkan nilai dominan sinyal arus pada deretan data arus. Analisis PSD dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MATLAB*. Metode *Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan metode yang digunakan untuk menentukan PSD, komponen *Fourier* ( $X(f_k)$ ) dari deret waktu  $x_t$  yang dicatat pada selang waktu  $h$  (1 hari) dengan persamaan berikut (Bendat dan Piersol, 1971):

$$X(f_k) = h \sum_{t=0}^{N-1} x_t \exp \left[ -i \frac{2\pi k t}{N} \right]$$

dimana:

- $t$  = 0, 1, 2, ..., N-1
- $h$  = selang perekaman data
- $N$  = jumlah data

Nilai densitas energi spektrum ( $S_x$ ) dihitung sebagai berikut:

$$S_x = \frac{2h}{N} |X(f_k)|^2$$

Korelasi silang digunakan untuk melihat ada atau tidaknya hubungan antara fluktuasi LJ dan SH. Analisis korelasi silang dilakukan pada komponen zonal dan meridional arus antar LJ dan SH pada kedalaman 15 m. Analisis korelasi silang terdiri dari kospektrum energi, koherensi dan beda fase.

Kospektrum densitas energi menggambarkan periode fluktuasi yang bersamaan antar kedua wilayah. Apabila LJ mempengaruhi SH maka keduanya akan menunjukkan periode fluktuasi

yang sama. Nilai koherensi yang tinggi menunjukkan hubungan yang kuat antara kedua parameter. Beda fase menunjukkan perbedaan waktu antara parameter. Beda fase positif menunjukkan bahwa fluktuasi parameter yang mempengaruhi mendahului parameter yang dipengaruhi. Kospektrum densitas energi ( $S_x(f_k)$ ) dihitung dari dua pasang data deret waktu  $x_t$  dan  $y_t$  yang dicatat dalam setiap selang waktu  $h$  dengan menggunakan rumus (Bendat dan Pirsol, 1971):

$$S_{xy}(f_k) = \frac{2h}{N} |X(f_k) * Y(f_k)|$$

dimana:

$$f_k = k/Nh, k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$X(f_k)$  = komponen *Fourier* dari  $x_t$

$Y(f_k)$  = komponen *Fourier* dari  $y_t$

Fungsi koherensi kuadrat dua ( $\gamma^2_{xy}(f_k)$ ):

$$\gamma^2_{xy}(f_k) = \frac{|S_{xy}(f_k)|^2}{S_x(f_k)S_y(f_k)}$$

dimana:

$S_x(f_k)$  = densitas spektrum energi dari  $X(f_k)$

$S_y(f_k)$  = densitas spektrum energi dari  $Y(f_k)$

Nilai beda fase ditentukan dengan menggunakan rumus:

$$\theta_{xy}(f_k) = \tan^{-1} \left[ \frac{Q_{xy}(f_k)}{C_{xy}(f_k)} \right]$$

dimana:

$Q_{xy}(f_k)$  = bagian imajiner dari  $S_{xy}(f_k)$

$C_{xy}(f_k)$  = bagian nyata dari  $S_{xy}(f_k)$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

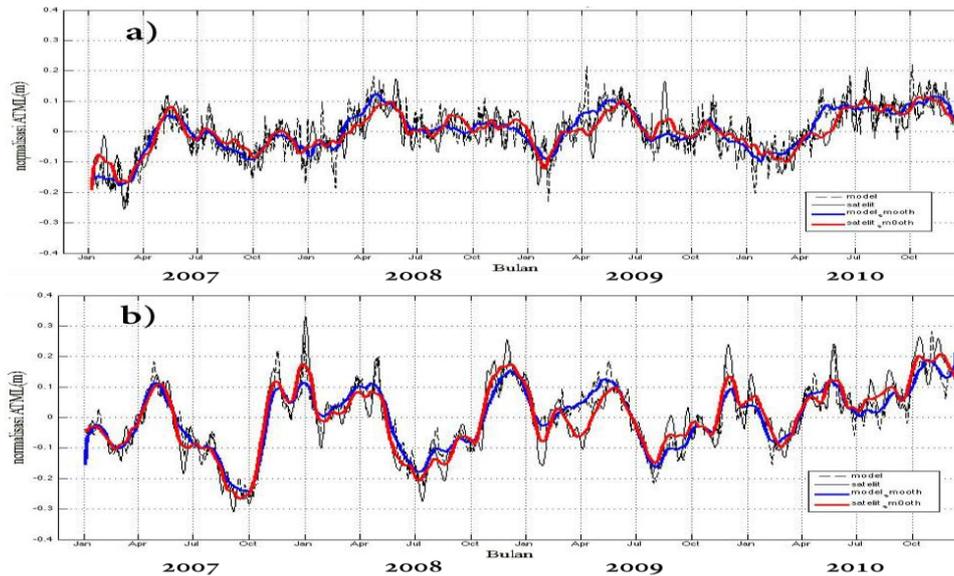
### Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan Anamoli Tinggi Muka Laut (SSHA) hasil keluaran simulasi model dengan data hasil dari satelit altimetri di wilayah LJ dan SH (Gambar 2). Nilai korelasi keduanya di LJ sebesar 0,76 dan di SH 0.90. Nilai ini

memperlihatkan hubungan yang cukup signifikan antara data satelit dan keluaran model, sehingga data model dapat digunakan untuk analisis selanjutnya. Nilai korelasi memperlihatkan nilai amplitudo SSHA yang dihasilkan model pada LJ dominan lebih tinggi dibandingkan altimetri. Pada SH nilai amplitudo antara model dan altimetri relatif sama.

Lebih tingginya perbedaan amplitudo model dan satelit di LJ diduga disebabkan beberapa faktor. Pertama, koreksi pasut yang digunakan untuk menghasilkan data altimetri adalah skala pasut global, sedangkan bagian utara merupakan suatu kawasan tertutup dan perairan dangkal. Kedua, model tidak memasukkan faktor pasut karena model tertarik hanya pada frekuensi skala rendah (Jawad, 2010). Berbeda dengan bagian selatan yang merupakan wilayah perairan terbuka, sehingga koreksi pasut global dapat berlaku dengan baik di wilayah ini. Hasil analisis RMSE menunjukkan bahwa nilai RMSE antara model dan satelit di LJ dan di SH cukup rendah sebesar 0,05 m. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa data keluaran model cukup baik dalam menggambarkan kondisi data observasi satelit.

Dari Gambar 2 terlihat bahwa pada periode Musim Barat di LJ memperlihatkan pola fluktuasi SSHA yang memiliki fase yang berbeda dengan SH. Pada musim ini SSHA di LJ cenderung bernilai negatif (minimal) yang menunjukkan rendahnya paras muka laut di LJ (Gambar 2a). Hal ini diduga disebabkan oleh arus yang mengalir ke timur selama musim barat berlangsung. Di LJ arus yang berimpit dengan sumbu bertiupnya angin muson selama musim barat akan bergerak ke timur dan membawa massa air meninggalkan Laut Jawa ke arah timur menyatu dengan massa air yang keluar lewat Selat Makassar dan mengalir ke arah timur sebagai arus yang kuat di sepanjang perairan utara Flores (Wyrtki, 1961; Gordon, 2005). Pada musim ini terjadi akumulasi massa air di bagian selatan Selat Sunda (SS) - sisi Samudera Hindia dan kekosongan di bagian utara SS - sisi Laut Jawa akibat pergerakan angin dari arah barat menuju timur.



Gambar 2. Data deret-waktu anomali tinggi muka laut (SSHA) di sisi utara Selat Sunda - LJ (a), dan di sisi selatan Selat Sunda - SH (b). Garis merah dan biru, masing-masing, adalah data deret-waktu SSHA satelit altimetri dan SSHA model INDESO yang sudah difilter. Nilai koefisien korelasi dari kedua data tersebut adalah sebesar 0.76 di lokasi LJ dan 0.90 di lokasi SH.

Hal sebaliknya terjadi di musim timur dimana paras muka laut di LJ yang cenderung lebih tinggi (maksimal) dibanding SH. Menurut Sakti (2004) tingginya paras laut di perairan utara Jawa diduga terjadi karena adanya arus yang mengalir dari timur ke barat yang terjadi selama musim timur, arus ini akan tertahan oleh daratan Pulau Sumatera sebelum mengalir ke Selat Karimata. Pergerakan angin dari timur ke barat menyebabkan akumulasi massa air di wilayah Laut Jawa dan kekosongan pada Samudera Hindia (Gambar 2b).

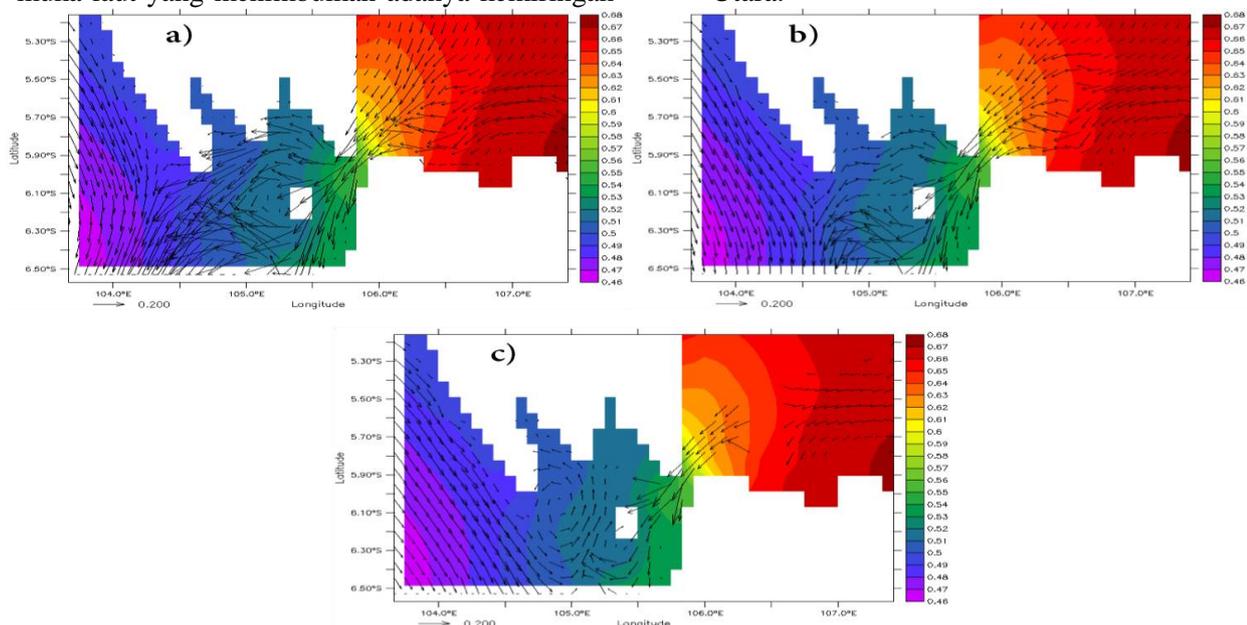
### Pola Sirkulasi Permukaan di Kawasan Selat Sunda

Pola sirkulasi permukaan yang ditunjukkan oleh rata-rata vektor arus (2007-2010) pada tiga level kedalaman (5 m, 15 m dan 29 m), yang ditumpang-susunkan dengan tinggi muka laut (SSH) disajikan pada Gambar 3. Tinggi muka laut di sisi LJ terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi muka laut di sisi SH. Gradien horisontal SSH yang besar terjadi di sekitar wilayah selat yang paling sempit, dan perbedaan SSH terbesar terjadi di lepas pantai SH dengan di LJ, sekitar 0.2 m. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, yang menyebutkan tinggi muka laut di sisi LJ selalu lebih tinggi dengan di

sisi SH (misalnya Susanto et al 2001). Pada kedalaman 5 m, pola sirkulasi di wilayah ini dicirikan dengan aliran massa air (arus) di wilayah LJ yang mengarah ke SH. Vektor arus mengalami peningkatan di perairan dalam Selat Sunda dan di sisi selatannya, dimana arus dari selat ini bertemu dengan arus permanen di sisi SH yang mengalir ke arah selatan dan tenggara. Arus permanen di SH diduga sebagai bagian dari Arus Pantai Selatan Jawa (APJ) yang mengalir menyusuri pantai barat Sumatera - selatan Jawa sampai ke selatan Kepulauan Sunda Kecil (Nusa Tenggara) (Quadfasel dan Cresswell, 1995; Sprintall et al., 2000). Batas pertemuan arus (*front*) dari selat dan dari SH berada di sekitar bujur 104.5BT (Gambar 3a). Di bagian perairan dalam selat, karena konfigurasi adanya pulau2 di dalam selat, maka vektor arus terlihat mengalami divergensi kearah sisi utara dan selatan dari tengah selat. Di sisi LJ, pola sirkulasi dicirikan oleh vektor arus yang mengarah ke barat di sepanjang utara Jawa bagian barat yang kemudian berbelok kearah baratdaya kedalam selat, sedangkan di sisi timur Sumatera bagian selatan, vektor arus bergerak kearah baratdaya kearah selat (Gambar 3a). Pola sirkulasi di kedalaman 5 m terlihat hampir sama terjadi di kedalaman 15 m dan 29 m (Gambar 3b dan 3c). Misalnya, arus permanen di SH, *front* arus di sekitar 104.5 BT, serta penguatan vektor

arus di Selat Sunda. Karena bathymetri perairan yang sudah mulai dangkal, maka vektor arus di perairan LJ terlihat mulai berkurang, terutama di sisi Sumatera dan pantai utara Jawa (Gambar 3c).

Penguatan arus terjadi ketika arus memasuki bagian selat yang paling sempit. Hal tersebut mungkin disebabkan karena adanya variasi tinggi muka laut yang menimbulkan adanya kemiringan



Gambar 3. Rerata vektor arus (2007-2010), yang ditumpang-susunkan dengan tinggi muka laut (SSHA) diperairan Selat Sunda dan sekitarnya, (a) vektor arus kedalaman 5 m, (b) kedalaman 15 m, dan (c) kedalaman 29 m.

### Struktur Menegak Arus

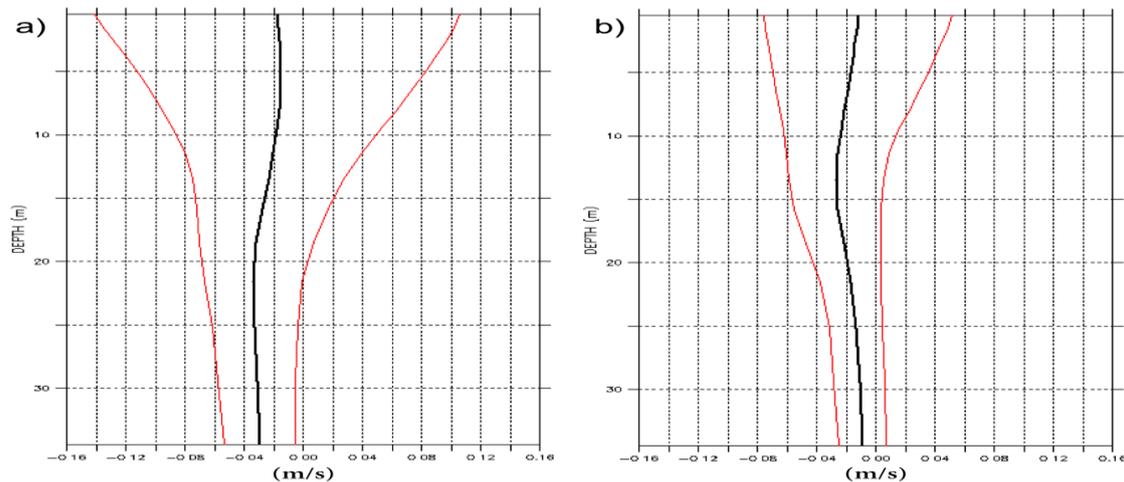
Profil menegak komponen arus zonal dan meridional rata-rata dari 2007-2010 di sisi LJ disajikan pada Gambar 4. Rerata komponen zonal dan meridional terlihat selalu negatif, yang berarti resultante arus kearah barat-baratdaya. Nilai simpangan baku paling lebar ditemukan di dekat permukaan, yang kemudian menurun nilainya dengan bertambahnya kedalaman (Gambar 4). Kecepatan rata-rata tertinggi komponen zonal terdapat pada kedalaman 21,6 m yakni sebesar 0,034 m/det ke arah barat dan kecepatan rata-rata tertinggi komponen meridional sebesar 0,027 m/det pada kedalaman 13,5 m menuju ke selatan. Nilai simpangan baku terbesar terdapat pada

(slope) permukaan laut (Tomczak dan Godfrey, 1994). Menurut Steward (2003) jika permukaan laut mempunyai kemiringan, maka akan terdapat gradien tekanan horizontal, sehingga massa air cenderung mengalir dari tekanan tinggi ke rendah dan diimbangi oleh gaya Coriolis massa air dibelokkan ke arah kiri untuk Belahan Bumi Selatan dan ke arah kanan untuk Belahan Bumi Utara.

permukaan, yang diduga faktor arus permukaan sangat sensitif

terhadap *forcing* atmosfer. Semakin bertambahnya kedalaman nilai simpangan baku semakin kecil. Pembalikan arus secara musiman di kedalaman antara permukaan sampai 20 m dapat dilihat dari nilai simpangan baku yang bernilai positif.

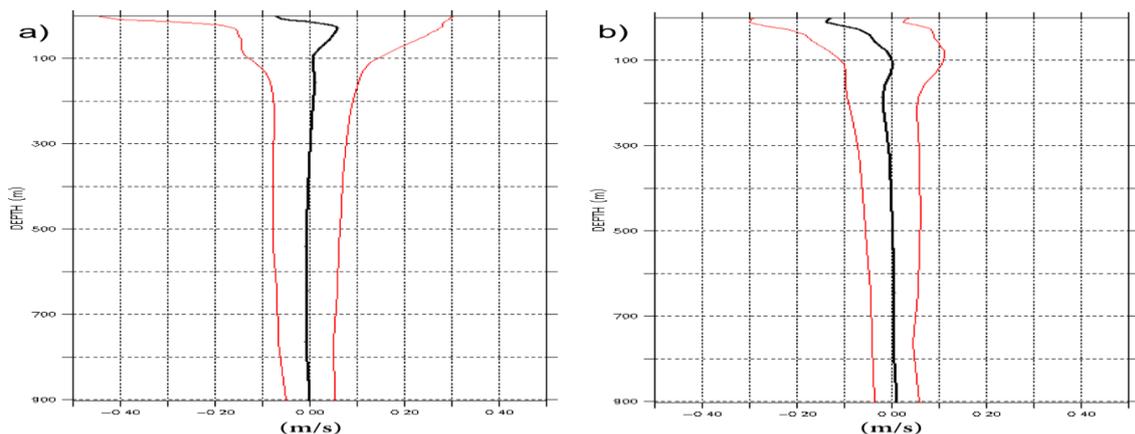
Gambar 4 memperlihatkan bahwa bahwa nilai rata-rata harian komponen zonal dan meridional bernilai negatif. Hal ini memperlihatkan bahwa rerata arus di LJ bergerak menuju ke baratdaya yakni ke arah Samudera Hindia. Seperti yang dinyatakan Wyrтки (1961) bahwa rerata transport massa air di Selat Sunda bergerak ke arah Samudera Hindia sepanjang tahun.



Gambar 4 Profil menegak rataaan komponen arus zonal (a) dan arus meridional (b), dan simpangan bakunya (garis merah) di lokasi LJ.

Profil menegak rataaan arus 2007-2010 di SH menunjukkan komponen zonal mencapai maksimum di permukaan (kearah barat) dan di kedalaman 10 m kearah timur (Gambar 5a). Komponen zonal tertinggi bernilai 0,071 m/det ke arah barat di permukaan dan kedalaman 10 m kearah timur. Komponen arus meridional, menunjukkan nilai kecepatan maksimum 0.137 m/s terjadi di permukaan kearah selatan, sehingga

resultante rerata arus di sisi SH adalah kearah tenggara (lihat Gambar 3). Di permukaan fluktuasi simpangan baku data lebih lebar, tetapi simpangan baku semakin kecil dengan bertambahnya kedalaman. Secara umum kecepatan arus komponen zonal positif dan meridional bernilai negatif pada tiap kedalamannya, hal ini menunjukkan bahwa arah arus cenderung menuju ke arah tenggara.



Gambar 5. Profil menegak rataaan komponen arus zonal (a) dan arus meridional (b), dan simpangan bakunya (garis merah) di lokasi SH.

### Fluktuasi Arus Secara Temporal

Sebaran arus rata-rata pada LJ berdasarkan level kedalaman, standar deviasi, nilai maksimal, minimal dan sudut rata-rata arus yang dibentuk disajikan pada Tabel 1. Arah dan kecepatan arus

hasil penapisan dengan metode *Hanning* tahun 2007-2010 pada tiga level kedalaman (5 m, 15 m dan 29 m) di LJ ditunjukkan dalam plot domain waktu untuk masing-masing komponen arus zonal dan meridional (Gambar 6).

Tabel 1. Deskripsi statistik arus di sisi LJ.

Kedalaman (m)	Rerata Kec. (m/s)	Simpangan Baku	Max (m/s)	Min (m/s)	Rerata Arah (°)
5	0.09	0.04	0.22	0.0005	190.4
15	0.05	0.02	0.15	0.0012	211.3
29	0.04	0.02	0.10	0.0020	244.5

Pada kedalaman 5 m kecepatan arus rata-rata sebesar 0.09 m/det dengan kecepatan maksimum 0,22 m/det. Dari gambar *stickplot* (tidak ditampilkan), arus cukup kuat pada musim peralihan I (Maret-Mei) dengan arah cenderung berubah-ubah menuju timur laut dan tenggara. Memasuki musim Timur (Juni-Agustus) hingga musim peralihan II (September-November) arus melemah dengan arah cenderung menuju barat daya. Hal ini sesuai dengan Pariwono (1999), yang menyatakan bahwa pada musim timur arus di Selat Sunda mengalir dari Laut Jawa menuju Samudera Hindia. Hal serupa juga dinyatakan oleh Hadikusumah (2003) bahwa karakteristik arus di Selat Sunda di lima stasiun mooring pada bulan Juli (Musim Timur) menunjukkan arah arus dominan menuju barat daya (Samudera Hindia) dengan kecepatan arus antara 0,01 m/det sampai 0,92 m/det. Pada musim Barat (Desember-Februari) arus kembali menguat dengan arah menuju ke tenggara. Hasil model menunjukkan bahwa pada kedalaman 5,078 m arus yang cukup kuat terjadi pada musim Peralihan I dan musim Barat.

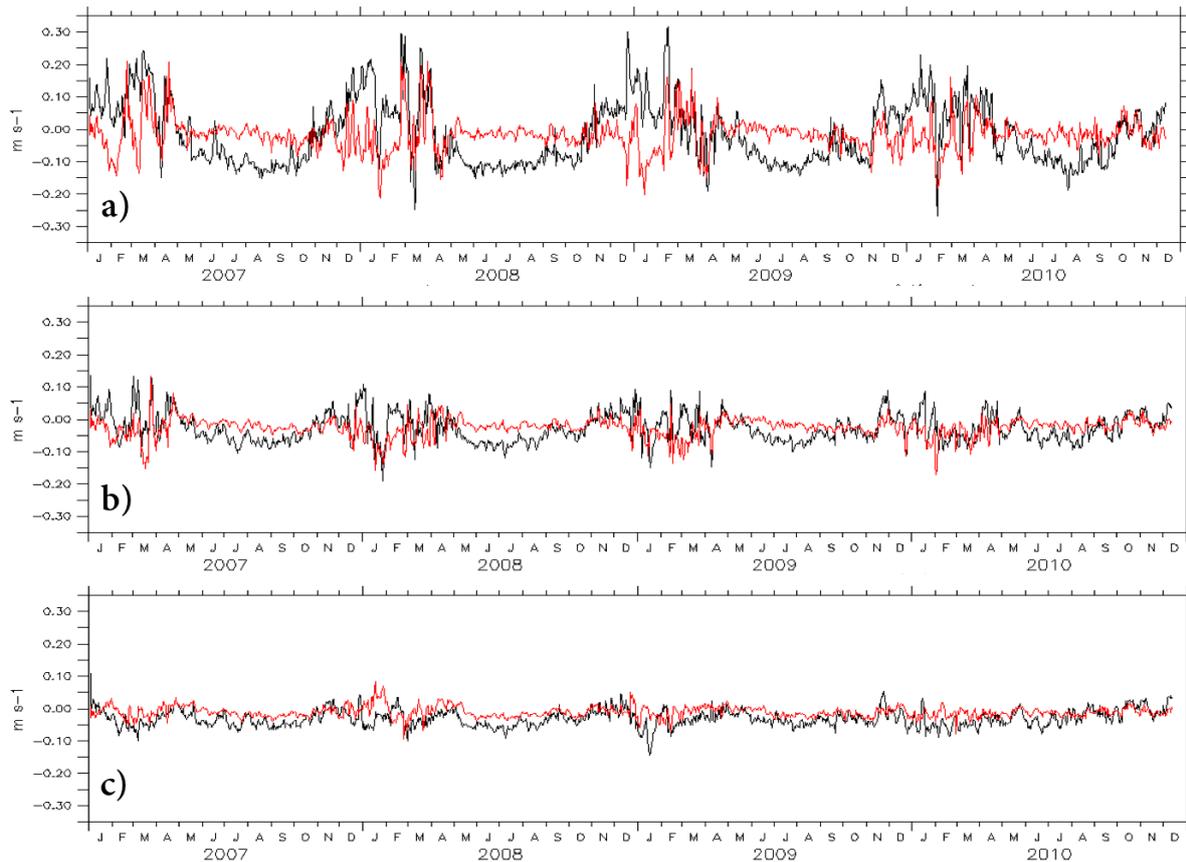
Pola arus di LJ pada kedalaman 5 m terlihat jelas untuk sebaran temporal masing-masing komponen (Gambar 6). Pada periode musim Barat setiap tahunnya terjadi penguatan arus dan perubahan arah yang cukup signifikan pada komponen zonal dan meridional dibanding musim lainnya. Pada musim ini, komponen zonal didominasi dengan arah menuju timur, sedangkan pada komponen meridional lebih fluktuatif dan cenderung menuju selatan (Gambar 6a).

Pada kedalaman 15 m arus melemah dengan rata-rata 0,05 m/det. Arus yang cukup kuat terjadi pada musim Barat (Gambar 6b). Arus cenderung stabil bergerak ke arah baratdaya. Pergerakan komponen utara-selatan arus didominasi oleh pergerakan menuju selatan (Gambar 6b). Perubahan arah arus terjadi pada musim Barat hingga musim peralihan I. Memasuki musim

Timur hingga musim peralihan II arus bergerak ke arah baratdaya dengan kecepatan yang melemah. Perubahan arah arus di kedalaman 15 m saat musim Barat masih terlihat pada masing-masing komponen arus (Gambar 6b) namun dengan kecepatan yang lebih lemah dibanding kedalaman 5 m. Arah pada komponen zonal secara keseluruhan lebih berfluktuatif dibanding dengan komponen meridional yang didominasi arah menuju selatan.

Kecepatan arus rata-rata pada kedalaman 29 m sebesar 0,04 m/det. Kecepatan dan arah arus relatif sama pada tiap musimnya (Gambar 6c). Arah arus cenderung menuju ke arah Barat Daya. Gambar *stickplot* (tidak ditampilkan) arus pada kedalaman ini tidak berubah arah dan kecepatan arus yang signifikan. Arus cenderung bergerak dengan kecepatan dan arah yang tetap. Pergerakan arus yang cenderung konstan juga diperlihatkan oleh sebaran masing-masing komponen arus. Komponen zonal dan meridional dominan bernilai negatif dengan arah barat-selatan atau barat daya.

Kecepatan arus di LJ semakin berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Karena menurut Groves (1989) besar kecilnya kecepatan arus dan pola sirkulasi lautan dipengaruhi oleh kedalaman kolom air, topografi bawah laut bentuk cekungan dan lokasi tempat dimana arus itu mengalir. Menurunnya kecepatan arus ini mungkin berkaitan dengan adanya lapisan pinoklin yaitu lapisan dimana densitas berubah secara drastis terhadap kedalaman. Lapisan ini berkaitan dengan lapisan termoklin dan haloklin (Baum, 2004). Sebaran temporal masing-masing komponen arus memperlihatkan bahwa arus di LJ memiliki pola yang mirip tiap tahunnya. Perubahan arah dan kecepatan arus yang signifikan terjadi pada musim Barat yakni menuju timurlaut dan tenggara dari musim sebelumnya yang cenderung menuju baratdaya.



Gambar 6. Data deret-waktu komponen arus zonal (hitam) dan meridional (merah) di lokasi LJ pada kedalaman (a) 5 m, (b) 15.8 m, (c) 29 m.

Deskripsi statistik arus di wilayah SH disajikan pada Tabel 2. Terlihat bahwa dengan bertambahnya kedalaman maka kecepatan arus

rata-rata semakin menurun. Besarnya sudut rata-rata yang dibentuk memperlihatkan bahwa arah arus berada di kuadran tiga namun lebih mengarah ke Selatan.

Tabel 2 Nilai rata-rata, standar deviasi, nilai maksimal dan minimal serta sudut rata-rata kecepatan arus di SH

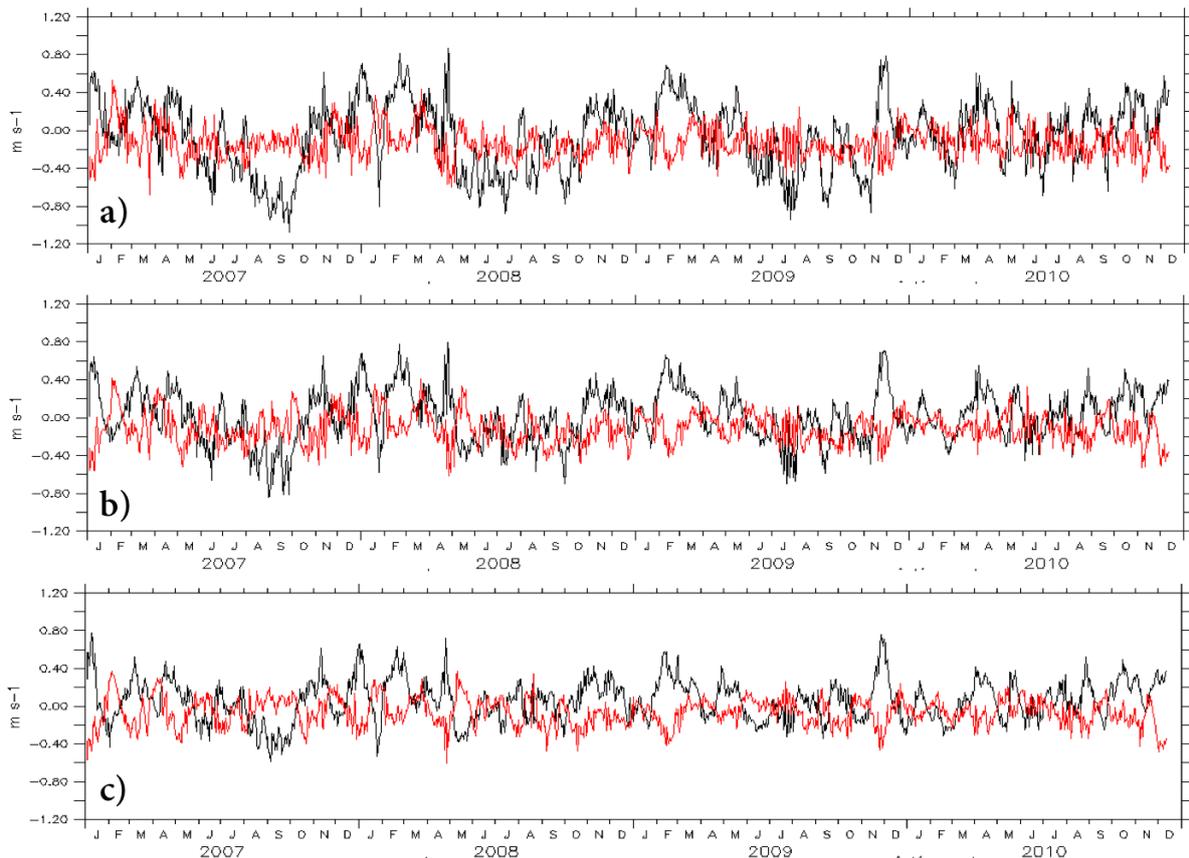
Kedalaman (m)	Rerata Kec. (m/s)	Simpangan Baku	Max (m/s)	Min (m/s)	Rerata Arah (°)
5	0.32	0.17	0.86	0.002	189.6
15	0.25	0.12	0.65	0.004	185.5
29	0.20	0.12	0.67	0.002	181.3

Fluktuasi temporal komponen arus pada 3 level kedalaman di SH (Gambar 7) menunjukkan kecepatan arus rata-rata pada kedalaman 5 meter sebesar 0,32 m/det dengan kecepatan maksimal mencapai 0,86 m/det. Pada tahun 2007 dan 2008 memasuki musim barat arus bergerak menuju tenggara. Perubahan arah terjadi pada akhir musim Barat (Bulan Februari) yakni menuju ke

arah timurlaut. Hal ini diduga disebabkan karena pada bulan November sampai Februari di belahan bumi bagian selatan bertiup Angin Muson Baratlaut yang mengakibatkan angin permukaan bergerak ke arah timur (Wyrтки, 1961), sedangkan tahun 2009 dan 2010 arus pada musim Barat cenderung bergerak ke arah tenggara.

Pada musim peralihan I di tahun 2007 dan 2008 arah masih cenderung bergerak dengan arah yang bervariasi menuju Tenggara, Timurlaut, Selatan dan Baratdaya. Pada tahun 2009 dan 2010 arus yang lebih lemah mengarah ke arah Tenggara dan Baratdaya. Arah arus cenderung menuju ke Tenggara dan Baratdaya ketika memasuki musim Timur dan Hingga akhir musim Peralihan II. Kecepatan arus menurun dengan bertambahnya tahun. Menurut Wyrcki (1973) pada saat musim Peralihan I dan musim Peralihan II berkembang Jet Wyrcki (*Indian Equatorial Jet*) yang bergerak arah timur di wilayah tropis Samudera Hindia hingga perairan barat Sumatera. Jet Wyrcki sangat berpengaruh terhadap perubahan karakter massa air di Samudera Hindia. Selain pengaruh Jet Wyrcki fluktuasi arus yang tak menentu di SH

kemungkinan juga disebabkan adanya kejadian datangnya gelombang Kelvin, yang terbentuk akibat gangguan yang berasal dari ekuator Samudera Hindia. Gangguan tersebut berupa angin baratan (*westerly wind bursts*) yang bertiup di bagian barat ekuator sekitar April-Mei dan Oktober-November menghasilkan gelombang Kelvin ekuator, dan berubah menjadi *coastally trapped Kelvin wave* bilamana telah menabrak dan menyusuri pantai barat Sumatera dan selatan Jawa (Clarke and Liu, 1994). Gelombang ini menjalar di ekuator lalu menabrak (*impinged*) Pulau Sumatera dalam waktu sekitar satu bulan kemudian terpecah ke utara dan selatan. Karakteristik gelombang di utara ekuator menjalar di kiri daratan sedangkan di selatan menjalar di sebelah kanan daratan.



Gambar 7. Data deret-waktu komponen arus zonal (hitam) dan meridional (merah) di lokasi SH pada kedalaman (a) 5 m, (b) 15 m, (c) 29 m.

Fluktuasi komponen zonal dan meridional pada kedalaman 5 m di SH (Gambar 7) terlihat rata-rata kecepatan zonal adalah sebesar 0,26 m/det dan kecepatan meridional sebesar 0,15 m/det. Arah

komponen zonal cenderung lebih bervariasi dibanding komponen arus meridional. Terlihat pula bahwa terjadi penguatan arus pada bulan-bulan tertentu dengan arah yang bervariasi.

Komponen meridional cenderung memiliki kecepatan arus konstan dan arah yang didominasi ke arah selatan. Pada kedalaman 15 meter kecepatan arus rata-rata yakni sebesar 0,25 m/det dengan kecepatan maksimal mencapai 0,67 m/det. Variasi arah arus pada kedalaman ini cenderung mirip dengan arah arus pada kedalaman 5 m. Fluktuasi komponen zonal dan meridional pada kedalaman ini menyerupai fluktuasi pada kedalaman 15 meter (Gambar 7b). Rata-rata kecepatan zonal adalah sebesar 0,19 m/det dan komponen meridional sebesar 0,14 m/det. Komponen zonal bergerak dengan arah yang bervariasi dimana terjadi penguatan arus pada Musim Barat sedangkan komponen meridional memiliki kecepatan arus yang konstan dengan arah didominasi menuju ke selatan.

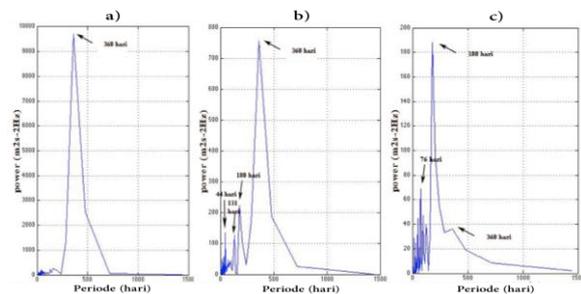
Besar kecepatan arus rata-rata pada kedalaman 29 meter (Gambar 7c) yakni sebesar 0,20 m/det dengan kecepatan maksimal mencapai 0,65 m/det. Pola arah arus yang terbentuk cenderung mengikuti pola arah arus pada kedalaman sebelumnya namun dengan kecepatan yang lebih kecil. Kecepatan arus melemah pada awal musim timur (Juni-Juli) dan kembali menguat memasuki musim peralihan II (Oktober). Gambar 7c menunjukkan bahwa pada komponen zonal di kedalaman 29 m penguatan arus juga terjadi pada Musim Barat dengan arah arus yang bervariasi antara barat-timur, sedangkan komponen meridional arah arus masih cenderung menuju ke selatan dan tidak terlihat penguatan arus secara signifikan. Rata-rata kecepatan komponen arus zonal adalah sebesar 0,15 m/det dan kecepatan komponen meridional adalah sebesar 0,10 m/det.

Amplitude kecepatan arus di SH lebih tinggi dibanding di LJ. Fluktuasi arah arus di SH lebih berfluktuasi dibandingkan di LJ. Hal ini bisa disebabkan karena wilayah SH mendapat pengaruh dari dinamika wilayah ekuator Samudera Hindia. Samudera Hindia memiliki pergerakan massa air yang tetap ke arah barat yang dikenal dengan Arus Khatulistiwa Selatan (*South Equatorial Current*), yang mengalir sepanjang tahun ke arah barat dari posisi geografis (10°LS, 100°BT) sampai Laut Madagaskar dan merupakan arus dangkal yang dalamnya kurang dari 200 meter. Tomczak dan Godfrey (1994) menambahkan bahwa kecepatan AKS biasanya

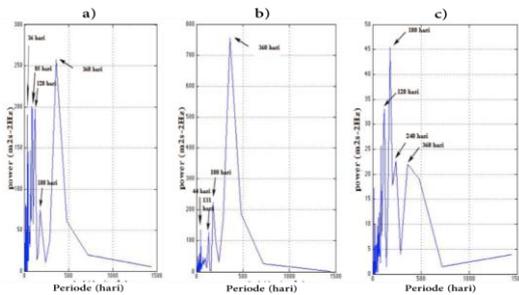
kurang dari 0,3 m/s walau dapat mencapai kecepatan 0,5 - 0,8 m/s pada wilayah 5°LU - 2°LS dan 60°T - 75°BT. Selain itu adanya aliran arus kuat ke arah timur yang dikenal dengan Arus Sakal Khatulistiwa Samudera Hindia (ASH) juga mempengaruhi besarnya kecepatan arus di SH. Tomczak dan Godfrey (1994) menyebutkan bahwa ASH memiliki kecepatan 0,5-0,8 m/det. Arus ASH yang mengalir ke arah timur-tenggara ini diduga terlihat jelas di sisi SH pada Gambar 3.

### Spektrum Densitas Energi Arus dan Koherensi Arus

Spektrum densitas energi (PSD) arus di LJ berdasarkan level kedalaman untuk komponen zonal dan meridional masing-masing ditampilkan pada Gambar 8 dan 9. Terlihat bahwa PSD komponen zonal dan meridional memiliki jumlah puncak spektral yang berbeda pada setiap level kedalaman. Pada kedalaman 5 m (Gambar 8a) PSD komponen zonal memiliki satu puncak spektrum yakni pada periode 360 harian. Pada kedalaman 15 m (Gambar 8b) memiliki empat puncak spektral yaitu pada periode 44 hari, 131 hari, 180 hari dan 360 hari, sedangkan pada kedalaman 29 m (Gambar 8c) memiliki tiga puncak spektral yaitu pada periode 76 hari, 180 hari, dan 360 hari.



Gambar 8. Spektrum densitas energi komponen **arus zonal** di LJ, (a) kedalaman 5 m, (b) kedalaman 15 m, (c) kedalaman 29 m.



Gambar 9. Spektrum densitas energi komponen **arus meridional** di LJ. (a) kedalaman 5 m, (b) kedalaman 15 m, (c) kedalaman 29 m.

Grafik PSD komponen meridional pada kedalaman 5 m (Gambar 9a) memiliki lima puncak spektral yaitu pada periode 36 hari, 85

hari 120 hari, 180 hari dan 360 hari. Di kedalaman 15 m (Gambar 9b) memiliki empat puncak spektral pada periode 44 hari, 131 hari, 180 hari dan 360 hari, sedangkan pada kedalaman 29 m (Gambar 9c) terdapat empat puncak spektral yaitu pada periode 120 hari, 180 hari, 240 hari dan 360 hari. Besarnya nilai densitas energi pada masing-masing puncak dapat dilihat pada Tabel 3, dimana nilai densitas energi komponen zonal lebih besar dibanding komponen meridional pada setiap level kedalaman. Besarnya spektrum densitas energi arus tergantung kepada besarnya amplitude fluktuasi arus di dalam rentang data deret-waktunya. Sehingga terlihat semakin bertambah kedalaman nilai amplitude PSD semakin kecil karena amplitude flutuasi arus semakin lemah.

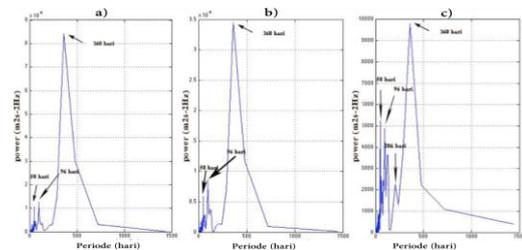
Tabel 3. Periodisitas fluktuasi komponen arus berdasarkan level kedalaman di LJ dan densitas energi signifikan.

Kedalaman (m)	Periode (hari)		Puncak densitas energi signifikan (m/det) <sup>2</sup> /cpd
	u	v	
5	u	360	9694
	v	360/ 180/ 120/ 85/ 36	257/ 74/ 197/ 200/ 190
15	u	360/ 180/ 131/ 44	754/ 222/ 127/ 134
	v	360/ 180/ 131/ 44	213/ 227/ 52/ 37
29	u	360/ 180/ 76	36/ 188/ 69
	v	360/ 240/ 180/ 120	22/ 23/ 45/ 33

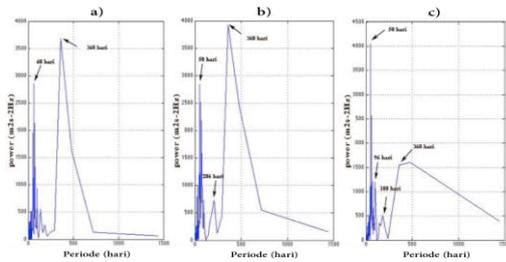
Secara keseluruhan periode puncak spektral energi di LJ menunjukkan bahwa variabilitas energi arus dipengaruhi oleh fenomena penggerak intra-musiman (36-85 hari), semi-*annual* (120-180 hari) dan *annual* (240-360 hari). Hasil spektrum energi komponen zonal yang dominan di kedalaman 5 m dan 15 m terjadi pada periode 360 hari yang artinya terjadi variabilitas kecepatan arus yang mengikuti fenomena tahunan (*annual*), sedangkan di kedalaman 29 m spektrum energi dominan terjadi pada periode 180 hari yang menunjukkan variabilitas kecepatan arus mengikuti fenomena semi-*annual*.

Komponen meridional di kedalaman 5 m memiliki nilai spektrum energi dominan pada periode 360 hari yang berarti mengikuti fenomena *annual*. Kedalaman 15 m dan 29 m spektrum energi arus yang dominan terjadi pada periode

180 hari yang mengikuti fenomena semi-*annual*. Sehingga dari PSD dapat disimpulkan bahwa variabilitas arus di LJ mengikuti fenomena *annual* dan semi-*annual*. Spektrum densitas energi (PSD) arus di SH untuk komponen zonal dan meridional berdasarkan level kedalaman dari Januari 2007 sampai Desember 2010 masing-masing ditampilkan pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Spektrum densitas energi komponen **arus zonal** di SH, (a) kedalaman 5 m, (b) kedalaman 15 m, (c) kedalaman 29 m



Gambar 11 Spektrum densitas energi komponen **arus meridional** di SH, (a) kedalaman 5 m, (b) kedalaman 15 m, (c) kedalaman 29 m.

Banyaknya puncak spektral yang dihasilkan berbeda untuk masing-masing komponen dan kedalaman. Untuk komponen zonal pada kedalaman 5 m (Gambar 11a) PSD memiliki tiga puncak spektral yakni pada periode 50 hari, 96

hari dan 360 hari, sedangkan komponen meridional (Gambar 11a) memiliki dua puncak spektral yakni pada periode 60 hari dan 360 hari. Pada kedalaman 15 m PSD komponen zonal (Gambar 11b) dan meridional (Gambar 11b) memiliki tiga puncak spektral yakni 50 hari, 96 hari dan 360 hari untuk zonal serta 50 hari, 206 hari dan 360 hari untuk meridional. Di kedalaman 29 m PSD memiliki lima puncak spektral untuk komponen zonal (Gambar 11c) yakni pada periode 50 hari, 96 hari, 131 hari, 206 hari dan 360 hari. Komponen meridional memiliki empat puncak spektral (Gambar 11c) yakni pada periode 50 hari, 96 hari, 180 hari dan 360 hari.

Tabel 4 Periode fluktuasi komponen arus berdasarkan level kedalaman di SH dan densitas energi signifikan

Kedalaman (m)	Periode (hari)		Puncak densitas energi signifikan (m/det) <sup>2</sup> /cpd
5	<i>u</i>	360/ 96/ 50	84090/ 12630/ 10610
	<i>v</i>	360/ 60	3677/ 2849
15	<i>u</i>	360/ 96/ 50	34460/ 8602/ 5902
	<i>v</i>	360/ 206/ 50	3915/ 2845/ 738
29	<i>u</i>	360/ 206/ 131/ 96/ 50	9805/ 2267/ 3643/ 5240
	<i>v</i>	360/ 180/ 96/ 50	1553/ 509/ 1203/ 4055

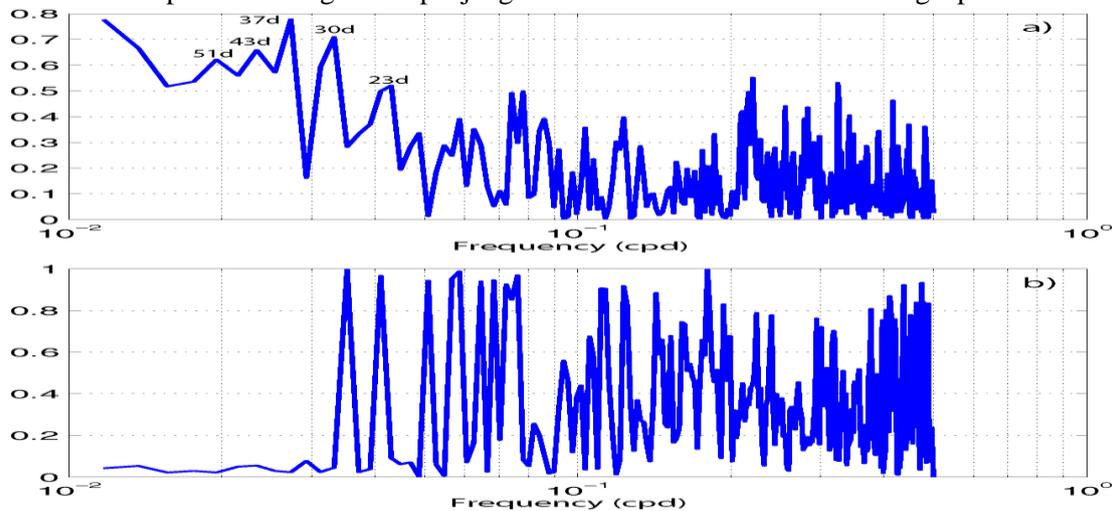
Besarnya nilai densitas energi pada masing-masing puncak dapat dilihat pada Tabel 4. Dari tabel dapat diketahui bahwa nilai densitas energi komponen zonal jauh lebih besar dibanding komponen meridional pada setiap level kedalaman. Densitas energi terbesar terdapat pada kedalaman 5 m. Berdasarkan puncak spektral energi, arus di SH dipengaruhi oleh fenomena intra- musiman (50-96 hari), semi-annual (131-206 hari) dan tahunan (360 hari). Namun periode spektrum energi dominan yang terjadi pada komponen zonal adalah pada periode 360 hari yang artinya variabilitas arus pada komponen zonal di tiga level kedalaman mengikuti fenomena tahunan (*annual*). Spektrum energi dominan komponen meridional di kedalaman 5 m dan 15 m terjadi pada periode 360 hari yakni mengikuti fenomena *annual*, sedangkan di kedalaman 29 m terjadi pada periode 50 hari sehingga variabilitasnya mengikuti fenomena intra musiman (*intraseasonal*).

Dengan panjang data deret-waktu arus selama 4 tahun (2007-2010), hasil analisis PSD (Gambar 8 - 11), terungkap bahwa variabilitas arus di SH dan LJ terjadi dalam periodisitas mulai dari intra-musiman sampai tahunan. Untuk melihat korelasi variabilitas arus di kedua lokasi itu, maka

dilakukan analisis *cross*-PSD dengan penggalan panjang segmen data 512 untuk analisis spektral pada skala intra-musiman, antara data deret-waktu komponen arus zonal di kedua lokasi SH dan LJ pada kedalaman 15 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai koherensi yang signifikan terjadi pada beberapa periode, seperti disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 12. Terlihat bahwa nilai koherensi tertinggi antara arus zonal di SH dan di LJ terjadi pada periode 37 harian dengan beda fase kurang dari <2 hari. Artinya bahwa fluktuasi arus dalam periode 37 harian yang terjadi di sisi selatan Selat Sunda - SH mendahului (*leading*) sekitar 2-3 hari dengan fluktuasi arus di sisi utara Selat Sunda - LJ. Mekanisme dan *forcing* terbentuknya variabilitas

arus dalam skala intra-musiman perlu dikaji lebih mendalam dalam kelanjutan penelitian ini. Beberapa makalah yang membahas tentang variabilitas arus di wilayah barat Sumatera dan selatan Jawa (misalnya Iskandar *et al.*, 2006), menyebutkan bahwa perturbasi angin di sepanjang

pantai Barat Sumatera serta di wilayah ekuator Samudera Hindia merupakan *forcing* utama terhadap variabilitas arus dalam skala intra-musiman tersebut, namun propagasi signal yang masuk kearah Laut Jawa melalui Selat Sunda masih belum terungkap secara jelas.



Gambar 12. Nilai koherensi signifikan dan fasenya dari hasil analisis cross-PSD antara data deret-waktu arus zonal di SH dengan di LJ pada kedalaman 15 m.

Tabel 5. Hasil analisis *cross-PSD* dengan keluaran nilai koherensi dan beda fase dalam rentang skala intra-musiman, antara arus zonal di SH dan LJ pada kedalaman 15 m.

No.	Freq. (cpd)	Periode (hari)	Koherensi	Beda Fase (hari)
1	0.0195	51	0.6214	1.107
2	0.0234	43	0.6582	2.361
3	0.0273	37	0.7776	1.858
4	0.0332	30	0.7088	1.359
5	0.043	23	0.5202	2.072

Dari uraian di atas terlihat bahwa karakteristik arus laut yang terjadi di Selat Sunda dan sekitarnya dicirikan oleh pola aliran merata dari LJ menuju ke arah SH, yang sesuai dengan penelitian sebelumnya. Namun demikian, dari penelitian ini perspektif baru terungkap adanya pembalikan aliran kearah utara yang terjadi dalam periode musim barat, yang diduga kuat terkait dengan intrusi gelombang ekuator SH ke arah LJ. Sirkulasi laut di wilayah dalam selat ditandai dengan lonjakan amplitude kecepatan arus sebagai respon aliran terhadap penyempitan selat. Struktur arus secara vertikal di sisi LJ

menunjukkan arus laut yang kuat terjadi di dekat permukaan sampai kedalaman sekitar 20m, tetapi di sisi SH arus kuta mencapai kedalaman sekitar 100 m. Karakteristik arus dan sirkulasi di wilayah Selat Sunda dan sekitarnya dari hasil kajian ini dapat memberikan basis informasi penting yang

dapat diterapkan untuk berbagai aspek kemaritiman, kelautan dan perikanan, seperti keselamatan pelayaran bagi kapal penyeberangan (ferry) Merak-Bakahuni, maupun kapal yang melintasi di wilayah ALKI 1 via Selat Sunda, prediksi penyebaran bahan pencemar yang cenderung terbawa ke arah SH, dan potensi perikanan samudera di wilayah batas arus (*front*)

antara Arus Pantai Jawa dan Arus Selat Sunda di sekitar 104.5 °BT.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa kesimpulan penting dari hasil studi ini pola sirkulasi, struktur menegak arus di wilayah Selat Sunda dan sekitarnya, serta variabilitas arus di sisi selatan Selat Sunda - Samudera Hindia dan sisi utara selat - Laut Jawa. Pola sirkulasi di wilayah ini dicirikan oleh tinggi muka laut yang lebih tinggi di sisi LJ dibanding di sisi SH, sehingga pola aliran (arus) dari LJ menuju SH. Intensifikasi arus terjadi di selat yang diduga karena terjadi penyempitan lebar aliran. Sistem arus permanen ditemukan di sisi SH yang diduga sebagai bagian dari Arus Pantai Jawa (APJ), dimana *front* APJ dengan arus dari selat terbentuk di sepanjang bujur 104.5°BT. Struktur arus menegak dicirikan oleh terbentuknya intensifikasi arus di dekat lapisan permukaan (kedalaman < 20 m). Simpangan baku terbesar terjadi di lapisan dekat permukaan yang diduga terkait dengan pembalikan arus dan serta sensitivitas arus terhadap *forcing* atmosfer.

Variabilitas arus menunjukkan amplitudo energi PSD tertinggi ditemukan di sisi SH karena energetik sistem arus tepi samudera. Rentang variabilitas arus di kedua lokasi terjadi mulai dari skala intra-musiman sampai tahunan. Untuk skala intra-musiman, koherensi yang tertinggi (0.78) dari arus di kedalaman 15 m di SH dan LJ terjadi pada periode 37 harian, dimana fluktuasi arus di SH mendahului sekitar 2 hari dari fluktuasi arus di sisi LJ. Hal ini berarti terjadi perambatan signal arus dari sisi SH menuju ke dalam LJ melalui Selat Sunda.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baum, S. K. 2004. *Glossary of physical oceanography and related disciplines*. Texas A & M University, Department of Oceanography.
- Bendat JS dan Piersol AG. 1971. Random data: analysis and measurement procedures. Wiley Series in probability and statistics, fourth edition. 640p.
- Clarke AJ and Liu X. 1994. Observations and dynamics of semiannual and annual sea levels near the eastern equatorial Indian Ocean boundary. *J of Phys Oceanog.*
- Dombrowsky E, Bertino L, Chanut J, Drillet Y, Huess V, Misyuk A, Siddorn J dan Tonani M. 2012. NEMO in Myocean Monitoring and Forcasting Centers (MFCS). Mercator Ocean Newsletter.
- Ducet N, Le Traon PY, Reverdin Dn G. 2000. Global high resolution of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J Geophys. Res.*, 105: 19477-19498.
- Emery WJ dan Thomson RE. 1997. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press.
- Gordon, A. 2005. *Oceanography of Indonesian Seas*. Oceanog., Vol.18, No. 4.
- Groves, D. 1989. *The Oceans: A book of questions and answers* (Vol. 7). Wiley.
- Hadikusumah. 2003. Karakteristik Arus di Selat Sunda Bulan Juli 2001. *Pesisir dan Pantai Indonesia*. 9(4):1-8.
- Iskandar, I. T. Tozuka, H. Sasaki, Y. Masumoto, T. Yamagata. 2006. Intraseasonal variations of surface and subsurface currents off Java as simulated in a high-resolution ocean general circulation model. *J Geophys Res*, Vol. 111, C12015, doi: 10.1029/2006JC003486.
- Jawad, MJ. 2010. Variabilitas arus laut di Selat Karimata dari model Mercator-Ocean. Skripsi (Tidak dipublikasikan). Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor, Bogor
- Le Traon PY, dan Ogor F. 1998. ERS1/2 orbis improvement using TOPEX/POSEIDON: the 2 cm challenge. *J. Geophys. Res.*, 103:8045-8057.
- Madec GP, Delecluse P, Imbard M dan Claire Levy. 1998. OPA 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual. *Note du Pole de Modelisation*. Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Paris.
- Minarto E, Heron S, Elizabeth V, Tjiong GP, Muzilman M dan Eka S. 2008. Distribusi Temperatur dan Salinitas Bulan November

- 2008 di Selat Sunda. Laporan Ekspedisi Bina Nusantara DIKTI-LIPI. Jakarta
- Nontji A. 2005. *Laut Nusantara*. Djambatan. Jakarta.
- Pariwono JI. 1999. Kondisi Oseanografi Perairan Pesisir Lampung. Proyek Pesisir Publication, Technical Report (TE- 99/12-I) Coastal Resource Center, University of Rhode Island. [15 Oktober 2009]
- Quadfasel D and Cresswell GR. 1992. A note on the seasonal variability of the South Java Current. *J Geophys Res*, 97, 3685-3688.
- Sakti, E.P. 2004. Variabilitas Angin dan Paras Laut serta Interaksinya di Perairan Utara dan Selatan Pulau Jawa. Skripsi (Tidak dipublikasikan). Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Susanto RD, Gordon AL, Zheng Q. 2001. Upwelling along the coasts of Java and Sumatera and its relation to ENSO. *Geophys Res Let*. 28, 8, 1599-1602.
- Sprintall J, Gordon AL, Murtugudde R, and Susanto RD. 2000. A Semiannual Indian Ocean Forced Kelvin Wave Observed in the Indonesian Seas in May 1997. *J. Geophys. Res.* 105 (C7): 17,217- 17,230.
- Stewart RH. 2003. Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas & M University.
- Tomczak M dan Godfrey JS. 1994. *Regional Oceanography: An Introduction*. Pergamon Press. Australia.
- Wyrtki K. 1961. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. NAGA Report Vol. 2. Scripps Inst. Oceanography. The University of California. La Jolla, California.
- Wyrtki K. 1973. An equatorial jet in the Indian Ocean, *Science*, 181:262-264.

