

KARAKTERISTIK DAN VARIABILITAS ARLINDO FLORES DAN KOHERENSINYA DENGAN ARUS PANTAI SELATAN JAWA

CHARACTERISTICS AND VARIABILITY OF THE FLORES ITF AND ITS COHERENCE WITH THE SOUTH JAVA COASTAL CURRENT

Agus S. Atmadipoera* dan Paradita Hasanah

Laboratorium Oseanografi Fisika, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB

*E-mail: atmadipoera_itk@ipb.ac.id

ABSTRACT

Characteristics and transport variability of the Indonesian Throughflow (ITF) in the western Flores Sea (FS) and its coherency with the South Java Coastal Current (SJCC) fluctuation are investigated using validated ocean general circulation model output (2008-2014) from the INDESO configuration. The results show that near-surface circulation in the study area is characterized by two distinct regimes: strong southwestward ITF flow and quasi-transient anti-cyclonic eddies. Vertical dimension of ITF crossing 7.5°S is about 112 km width, 250 m depth, and high velocity core at thermocline >0.3 m/s. Transport volume estimates along this latitude is -4.95 Sv (southward). Bifurcation of ITF flow appears north offshore Lombok Island where -2.92 Sv flowing into Lombok Strait and the rest flowing eastward into FS. Meanwhile, vertical dimension of SJCC crossing 114°E is about 89 km width, 120 m depth, and high velocity core at sub-surface >0.35 m/s. Mean transport of SJCC is +2.65 Sv. Coherency between Flores ITF and SJCC transport variability on intra-seasonal scales is significantly high, e.g., on 30 day period (coher=0.92) and phase-lags of 0.6-day with SJCC leading to Flores ITF. This result confirmed previous studies, related to intrusion of coastally trapped Kelvin waves into Flores Sea via Lombok Strait.

Keywords: *indonesian throughflow, western flores sea, south java coastal current*

ABSTRAK

Karakteristik dan variabilitas transpor Arlindo di Laut Flores (Arlindo Flores, AF) dan koherensinya dengan fluktuasi transpor dari Arus Pantai Selatan Jawa (APSJ) dikaji menggunakan keluaran model sirkulasi umum laut INDESO yang telah divalidasi (2008-2014). Hasil penelitian menunjukkan pola sirkulasi dekat permukaan dicirikan oleh dua wilayah unik: wilayah sumbu arus kuat AF yang memotong wilayah studi ke arah baratdaya menuju Selat Lombok (SL), dan quasi-transient pusaran arus (*eddies*) anti-siklonik di utara Laut Bali. Dimensi menegak AF di garis lintang 7,5 °S adalah lebar 112 km, kedalaman 0-250 m dan inti kecepatan tinggi (>0,3 m/s) di kedalaman termoklin. Rerata volume transpor di lintang ini adalah -4,95 (ke arah selatan). Bifurkasi AF terjadi di utara lepas pantai Pulau Lombok dimana sebagian AF (-2,92 Sv) mengalir ke Selat Lombok dan sisanya berlanjut ke timur Laut Flores. Di garis bujur 114 °E Selatan Jawa, dimensi menegak APSJ adalah lebar 89 km, kedalaman 0-120 m, dan kecepatan tinggi (>0,35 m/s) di kedalaman permukaan. Rerata volume transpor APSJ sekitar +2,65 Sv (ke arah timur). Koherensi antara fluktuasi transpor AF dan APSJ pada skala intra-musiman tercatat tinggi, misalnya pada periode 30 harian, koherensinya 0,92 dengan beda-fase 0,6 hari dimana fluktuasi transpor APSJ mendahului terhadap AF. Hal ini diduga terkait dengan intrusi *coastally trapped* gelombang Kelvin ke Flores via Selat Lombok.

Kata kunci: arus lintas indonesia (Arlindo), laut flores bagian barat, arus pantai selatan jawa

I. PENDAHULUAN

Laut Flores bagian barat (termasuk Laut Bali) merupakan wilayah persimpangan

arus utama yang berasal dari Arus Lintas Indonesia (Arlindo) Makassar, Arus Muson Jawa yang berbalik arah dua kali dalam setahun, serta intrusi arus dari Selatan Jawa -

sisi Samudera Hindia via Selat Lombok akibat dari kedatangan gelombang Kelvin yang terperangkap pantai (Wyrcki, 1961; Murray dan Arief, 1988; Syamsudin *et al.*, 2004; Sprintall *et al.*, 2005; Atmadipoera *et al.*, 2009). Wilayah ini diduga mempunyai karakteristik arus yang sangat unik dan menarik untuk dikaji dan dipahami secara detail.

Arlindo adalah sistem arus termoklin yang mengalir dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia melalui berbagai selat, sub-basin, dan laut di perairan dalam Laut Indonesia, dan sebagai cabang utama arus dari sirkulasi termohalin global yang membawa massa air hangat dan lebih asin dari Pasifik (Gordon 1986). Adanya perbedaan tinggi paras laut antar samudera, dimana paras laut Pasifik lebih tinggi dari pada Hindia merupakan salah satu penggerak Arlindo. Perbedaan tinggi paras laut ini bervariasi secara musiman (Wyrcki, 1961), dimana dalam periode Musim Baratlaut (Oktober–Maret), tinggi paras laut mencapai minimum (kurang dari 10 cm), sedangkan dalam Musim Tenggara (Mei–September) tinggi paras laut maksimum sekitar 28 cm. Perbedaan tinggi paras laut ini mengakibatkan volume angkutan (*transport*) Arlindo mencapai maksimum dalam periode Musim Tenggara, dan minimum dalam Musim Baratlaut (Hautala *et al.*, 2001; Gordon dan Susanto, 2003; Gordon *et al.*, 2010; Sprintall *et al.*, 2009).

Arlindo memasuki perairan Indonesia melalui dua gerbang masukan (*inflow gate*) yaitu pintasan barat melalui Laut Sulawesi dan pintasan timur melalui Laut Halmahera dan Laut Maluku, dimana komponen penyusun massa air Arlindo terdiri dari massa air dari Pasifik Utara dan Pasifik Selatan (Wyrcki, 1961; Gordon and Fine, 1996; Atmadipoera *et al.*, 2009). Massa air Pasifik Utara dibawa oleh Arus Mindanao yang memasuki Indonesia melalui Laut Sulawesi menuju Selat Makassar, kemudian di Laut Flores bagian barat sekitar 20% massa air keluar menuju Samudera Hindia melalui

Selat Lombok dan sisanya diteruskan ke Laut Flores dan Laut Banda (Murray dan Arief, 1988). Massa air Pasifik Selatan masuk melalui Laut Halmahera dan Laut Maluku menuju Laut Seram, kemudian dilanjutkan ke Laut Banda. Di Laut Banda, terjadi pertemuan antara massa air Pasifik Utara dan Pasifik Selatan sebelum keluar melalui Lintasan Timor dan Selat Ombai (Atmadipoera *et al.*, 2009).

Laut Flores bagian barat juga dipengaruhi oleh adanya perambatan *coastally trapped* gelombang Kelvin, yang berasal dari Ekuator Samudera Hindia. Gelombang ekuator ini dibangkitkan oleh angin baratan yang kuat (*westerly winds bursts*) di Ekuator Samudera Hindia Tengah pada musim transisi (Mei dan Oktober), yang menggerakkan arus kuat ekuator (*Equatorial Jet*) ke arah timur (Wyrcki, 1973). Gelombang Kelvin Ekuator tersebut berubah menjadi *coastally trapped Kelvin waves* dan bergerak menyusuri Barat Sumatera-Selatan Jawa, kemudian sebagian masuk melalui Selat Lombok sebelum memasuki Selat Makassar (Sprintall *et al.*, 2000). Dalam skala-waktu intra-musiman (35-90 hari), gelombang Kelvin yang menjalar di sepanjang Selatan Jawa, Bali, Lombok, dan Paparan Sunda Kecil muncul pada bulan April–Mei atau November - Desember (Syamsudin *et al.*, 2004). Intrusi ke arah utara dari gelombang Kelvin di Selat Lombok berdampak terhadap pelemahan volume transpor Arlindo Lombok. Selain itu juga Gelombang Kelvin dapat membalikkan arah arus pada lapisan kedalaman tertentu (Sprintall *et al.*, 2000).

Beberapa kajian dinamika arus sebelumnya difokuskan di Selat Lombok dan di Selatan Jawa - sisi Samudera Hindia, tetapi belum ada kajian spesifik mengenai dinamika dan variabilitas Arlindo Flores di bagian utara Selat Lombok dan kaitannya dengan APJS di Selatan Jawa. Tujuan makalah ini adalah untuk mengkaji karakteristik dan pola sirkulasi laut Arlindo Flores, serta variabilitas transpor Arlindo Flores di bagian barat Laut Flores dan koherensinya dengan

fluktuasi transpor Arus Pantai Selatan Jawa (APSJ) di Selatan Jawa - sisi Samudera Hindia. Kajian secara detil mengenai karakteristik dan variabilitas Arlindo Flores masih sedikit, sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai Arlindo Flores serta kaitannya dengan sistem APSJ di Selatan Jawa.

II. METODE PENELITIAN

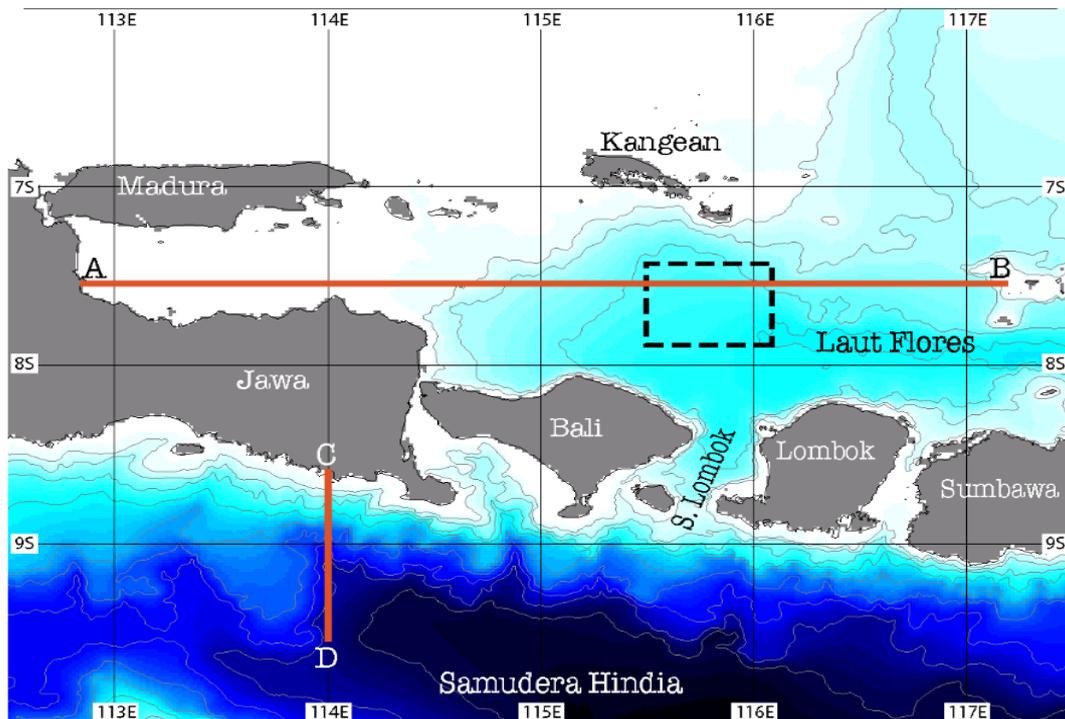
2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan September 2016 sampai Februari 2017 di Laboratorium Oseanografi Fisika, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan (ITK) FPIK IPB. Wilayah studi difokuskan di bagian barat Laut Flores (termasuk Laut Bali) dengan batasan wilayah $6.0^{\circ}\text{LS} - 9.5^{\circ}\text{LS}$ dan $112.5^{\circ}\text{BT} - 117.5^{\circ}\text{BT}$ (Gambar

1). Data deret-waktu keluaran model INDES0 yang digunakan dalam penelitian ini dari bulan Januari 2008 sampai Desember 2014 (7 tahun).

2.2. Bahan dan Data Penelitian

Sumber data deret-waktu untuk penelitian ini diperoleh dari hasil simulasi model sirkulasi umum laut dengan konfigurasi *Infrastructure Development for Space Oceanography* (INDES0), yang dilakukan oleh CLS/Mercator-Océan Toulouse Prancis, sebagai program andalan dari Kementerian Kelautan dan Perikanan Indonesia. Konfigurasi dan validasi model INDES0 telah dideskripsikan secara detail oleh Tranchant *et al.* (2015). Keluaran model INDES0 berupa rata-rata harian data arus (komponen zonal u dan meridional v), suhu, salinitas, dan tinggi muka laut dengan rentang data deret-waktu 7 tahun (1 Januari 2008- 31 Desember 2014).



Gambar 1. Wilayah Studi di bagian barat Laut Flores (termasuk Laut Bali), dan sebagian Selatan Jawa-Sumbawa. Garis A-B merupakan transek untuk perhitungan volume transpor Arlindo Flores di lintang 7.5°LS . Garis C-D untuk perhitungan transpor Arus Pantai Selatan Jawa (APSJ) di bujur 114°BT . *Sampling box* (garis putus-putus, kotak hitam) untuk validasi data deret-waktu tinggi muka laut (SSH) model dan altimetri satelit.

Di dalam studi ini, untuk keperluan validasi model digunakan data anomali tinggi muka laut dari hasil observasi satelit altimetri dan citra suhu permukaan laut, yang diperoleh dari *Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic* (AVISO) Toulouse Prancis, serta data observasi arus dari hasil ekspedisi kelautan INDOMIX 2010.

2.3. Pengolahan dan Analisis Data

Pola sirkulasi dan variabilitas arus di wilayah studi dikaji dengan menerapkan analisis data deret-waktu (*time-series analysis*), yaitu menghitung nilai rata-rata (*mean*) arus komponen zonal dan meridional (2008-2014), analisis transformasi wavelet sinambung (*continuous wavelet transform*, CWT), dan analisis *cross Power Spectral Density* (*cross-PSD*) dengan mengacu kepada Emery dan Thomson (2014) serta Bendat and Piersol (2010). Rataan kecepatan arus bertujuan untuk menganalisis pola sirkulasi umum di wilayah studi dalam bentuk spasial. Metode klimatologi digunakan untuk menganalisis siklus tahunan dari variabel arus dan suhu. Estimasi volume *transpor* massa air Arlindo Flores (Q_v) yang melewati transek garis A-B pada lintang 7.5°LS di Laut Flores, atau *transpor* APJS (Q_u) pada transek garis C-D pada bujur 114°BT di Selatan Jawa dihitung dengan mengintegrasikan kecepatan arus komponen zonal (u) atau meridional (v) terhadap panjang transek dan kedalaman, yang mengikuti metode dari Emery dan Thomson (2014) :

$$Q_{v_{A-B}} = \int_A^B \int_z^0 v \, dx \, dz \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{u_{C-D}} = \int_C^D \int_z^0 u \, dy \, dz \dots\dots\dots(2)$$

dimana di Laut Flores, $Q_{v_{A-B}}$ (unit Sv) adalah besarnya volume *transpor* Arlindo yang memotong garis A-B; A (112.5°BT) dan B (117.5°BT) adalah batas garis transek bujur (meter); z (380 m) adalah batas bawah integrasi kecepatan sampai kedalaman

permukaan (0 m), dan v adalah komponen arus meridional (m/detik). Hal yang sama juga untuk menghitung volume *transpor* APJS di Selatan Jawa, dimana $Q_{u_{C-D}}$ (unit Sv) adalah besarnya volume *transpor* APJS (unit Sv), C (8.5°LS) dan D (9.5°LS) adalah batas garis transek lintang (meter), z (380 m) batas bawah kedalaman integrasi dan u adalah komponen arus zonal (m/detik).

Metode analisis CWT dilakukan terhadap data untuk menguji variasi *power* di dalam data deret-waktu (Torrence dan Compo, 1998). Data deret-waktu direntangkan dalam ruang waktu-frekuensi, yang memungkinkan penentuan periodisitas dominan dari variabilitas dan variasinya dalam waktu (Torrence dan Compo, 1998; Emery dan Thomson, 2014). Dalam makalah ini, analisis CWT diterapkan pada data deret-waktu volume *transpor* Arlindo dan APJS, serta merekonstruksi fluktuasi *transpor* pada skala intra-seasonal dengan melakukan *band-pass filter* deret-waktu *transpor* dengan *cut-off* periode 20-90 hari (fluktuasi 20-90 harian dikategorikan secara konvensi sebagai fluktuasi intra-seasonal). Penggunaan analisis CWT untuk menganalisis periodisitas yang signifikan pada selang kepercayaan 95%. Metode CWT yang digunakan merupakan hasil modifikasi dari Torrence dan Compo (1998) oleh Mélice *et al.* (2001). *Wavelet* diperoleh dari fungsi tunggal ψ oleh translasi dan dilatasi (pers. 3), dimana $a > 0$ merupakan parameter dilatasi dan b parameter translasi waktu :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \dots\dots\dots(3)$$

Penelitian ini dipilih wavelet Morlet, yang merupakan fungsi gelombang kosinus kompleks dimodulasi oleh fungsi Gaussian (pers. 4) dengan $i = [-1^{1/2}]$:

$$\psi(t) = \pi^{1/4} e^{-t^2/2} e^{i\omega_0 t} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan $\omega_0 = \pi \left[\frac{2}{\ln 2} \right]^{1/2}$ dipilih cukup lebar untuk meyakinkan bahwa $\psi(t)$

memenuhi kondisi yang diperbolehkan, yang secara praktis sebanding dengan pers. 5 berikut :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \dots\dots\dots(5)$$

Membalikan (*inverting*) skala *wavelet* Morlet, *continuous wavelet transform* (CWT) menjadi analisis frekuensi-waktu dimana parameter dilatasi *a* berhubungan dengan periode dan parameter translasi *b* berhubungan dengan waktu. Di dalam (Pers. 3) normalisasi $1/a$ dipilih, bukan seperti biasa $1/a^{1/2}$. Pilihan ini, komponen-komponen CWT dapat dibandingkan secara langsung satu dengan lainnya dan *wavelet* Morlet dapat diinterpretasikan sebagai *filter* linear band-pass dari pembobot $1/a$ yang berpusat sekitar $\omega = \omega_0/a$. Hal ini memungkinkan untuk mengekstraksi komponen-komponen lokal yang berbeda dari signal, seperti nilai lokal, *amplitude* dan fase untuk setiap titik dari (*b, a*) ruang frekuensi-waktu (Méllice *et al.*, 2001).

Analisis *cross-PSD* (*cross-Power Spectral Density*) digunakan untuk menganalisis hubungan fluktuasi dua variabel deret-waktu pada frekuensi yang sama, yaitu deret-waktu transpor Arlindo Flores dan transpor APJS. Pada penelitian ini, analisis *cross-PSD* digunakan untuk mengamati korelasi antara fluktuasi volume transpor Arlindo di Laut Flores dengan fluktuasi transpor APJS di Selatan Jawa pada periode intra-musiman (20-90 hari). Keluaran dari analisis *cross-PSD* terdiri dari energi *cospektrum*, koherensi, dan beda fase.

Kospektrum energi menunjukkan besarnya energi fluktuasi pada frekuensi yang sama antara kedua data deret-waktu. Koherensi menunjukkan nilai korelasi kedua data deret-waktu pada frekuensi yang sama, dan beda fase antara 2 data deret-waktu menunjukkan perbedaan selang waktu antara kedua variabel. Beda fase positif menunjukkan bahwa fluktuasi variabel 1 mendahului (*lead*) terhadap variabel 2, sedangkan beda

fase negatif menunjukkan bahwa fluktuasi variabel 1 tertinggal (*lagged*) terhadap variabel 2 (Emery and Thomson 2014).

Energi kospektrum ($G_{xy}(f_k)$) dihitung dari dua pasang komponen *Fourier* dari data deret-waktu x_t dan y_t yang diukur dalam setiap selang waktu Δt dengan menggunakan rumus (Bendat dan Piersol, 2010):

$$G_{xy}(f_k) = \frac{2\Delta t}{T} |X(f_k) * Y(f_k)| \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan: $X(f_k)$ adalah komponen *Fourier* dari x_t , $Y(f_k)$ adalah komponen *Fourier* dari y_t , dan T merupakan periode data.

Selanjutnya menentukan fungsi koherensi ($\gamma^2_{xy}(f_k)$) dihitung menggunakan persamaan (Bendat dan Piersol 2010):

$$\gamma^2_{xy}(f_k) = \frac{|G_{xy}(f_k)|^2}{S_x(f_k)S_y(f_k)} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan: $S_x(f_k)$ adalah densitas energi $X(f_k)$ dan $S_y(f_k)$ = densitas energi $Y(f_k)$. Nilai beda fase ($\theta_{xy}(f_k)$) dihitung menggunakan persamaan (Bendat dan Piersol, 2010):

$$\theta_{xy}(f_k) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f_k)}{C_{xy}(f_k)} \right] \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan: $Q_{xy}(f_k)$ = nilai imajiner dari $G_{xy}(f_k)$ dan $C_{xy}(f_k)$ = nilai nyata dari $G_{xy}(f_k)$.

Analisis *cross-PSD* deret-waktu transpor Arlindo Flores dan transpor APJS, parameter komputasi yang diterapkan adalah sebagai berikut: panjang data (N) dengan *sampling interval* harian dari 1 Januari 2008 - 31 Desember 2014) adalah 2557, panjang segmen (*segment-length*) cuplikan data adalah 512, dihitung batas bawah dan atas dari selang kepercayaan 95%, dan digunakan jenis *window* Bartlett.

2.4. Validasi Data Model dengan Data Observasi

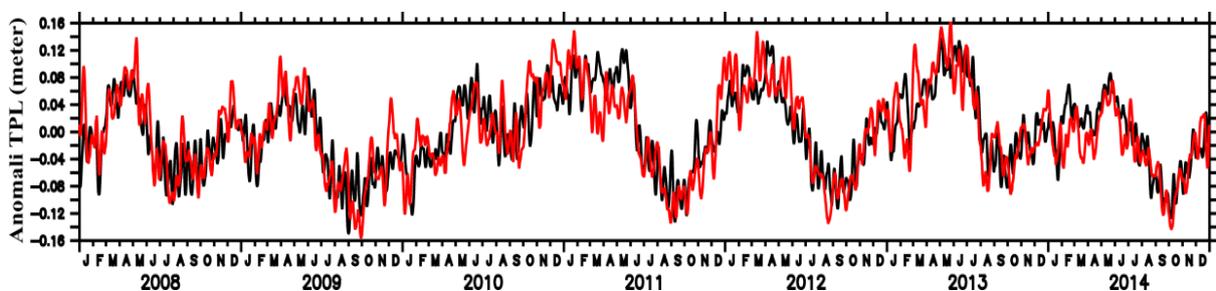
Sebelum keluaran model INDES0 digunakan untuk analisis deret-waktu lebih lanjut, maka langkah pertama dalam analisis data adalah memvalidasi deret-waktu keluaran model INDES0 dengan data observasi satelit dan lapangan. Tujuannya adalah untuk menguji tingkat akurasi dan reliabilitas keluaran model terhadap data hasil observasi. Uji korelasi variabel tinggi muka laut keluaran model INDES0 dilakukan dengan data tinggi muka laut dari satelit altimetri, serta arus model INDES0 divalidasi dengan data pengukuran arus dari hasil ekspedisi INDOMIX Juli 2010 yang melintasi Selat Lombok dan Laut Bali.

Data deret-waktu tinggi paras laut dari tahun 2008 – 2014 hasil simulasi model INDES0 dan data altimetri satelit (Gambar 2) menunjukkan korelasi yang tinggi, dengan koefisien korelasi sebesar 0.85. Hasil uji korelasi ini berarti tingkat keerratan antara keluaran model dengan data satelit adalah tinggi. Plot tinggi paras laut hasil INDES0 (hitam) dan hasil satelit (merah) menunjukkan pola fluktuasi yang sama. Tinggi paras laut hasil dari model dan satelit menunjukkan pola fluktuasi dominan dengan periode tahunan (*annual*). Tinggi paras laut maksimum terjadi pada Musim Baratlaut hingga musim peralihan I, sedangkan tinggi paras laut minimum terjadi pada Musim Tenggara hingga musim peralihan II.

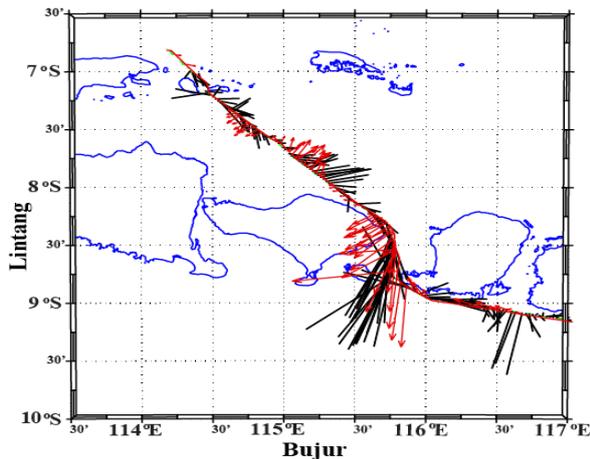
Arus pada level kedalaman 30 meter dari model INDES0 juga divalidasi meng-

gunakan arus hasil pengukuran INDOMIX Juli 2010. Pada ekspedisi tersebut kapal riset yang dilengkapi *shipboard acoustic Doppler current profiler* (SADCP) melintasi Selat Lombok dari arah selatan dan memotong Laut Bali ke arah baratlaut (Gambar 3). Vektor arus model berupa resultante arus zonal dan meridional diplotkan sesuai dengan hasil pengukuran dari ekspedisi INDOMIX tanggal 18 Juli 2010. Vektor arus pada level kedalaman 30 m dari model INDES0 (panah merah) polanya terlihat sangat mirip dengan vektor arus hasil pengukuran INDOMIX (panah hitam). Arus di Laut Bali bergerak ke arah timurlaut dan barat daya yang mengindikasikan suatu pusaran arus (*eddy*), serta arus kuat (*jet*) di Selat Lombok bergerak ke selatan sebagai representasi Arlindo Lombok.

Beberapa lokasi, besaran amplitudo vektor arus dari model INDES0 terlihat sedikit melemah dibandingkan dengan hasil observasi seperti di sebelah selatan Pulau Lombok dan di sebelah utara Pulau Bali. Hal ini diduga karena perbedaan resolusi data dimana model INDES0 merupakan rata-rata dari resolusi spasial 9 km x 9 km, tetapi data observasi arus INDOMIX merupakan rata-rata 1 km. Dari 2 validasi data keluaran model INDES0 dengan data observasi, dapat dikatakan bahwa keluaran model INDES0 dapat mereproduksi cukup bagus fluktuasi tinggi muka laut dan pola spasial vektor arus, sehingga kualitas hasil simulasi model INDES0 dapat digunakan untuk analisis lanjutan dalam studi ini.



Gambar 2. Deret-waktu anomali tinggi paras laut 2008-2014 dari model INDES0 (hitam) dan data satelit altimetri (merah) yang diekstraksi kotak Gambar 1. Nilai koefisien korelasi adalah 0,85.



Gambar 3. Tumpang-susun vektor arus pada bulan Juli 2010 di level kedalaman 30 m dari observasi *shipboard* ADCP INDOMIX (panah hitam), dengan vektor arus keluaran model INDES0 (panah merah).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik dan Pola Sirkulasi di Laut Flores Bagian Barat

Pola sirkulasi laut di bagian barat Laut Flores dicirikan oleh 2 wilayah arus yang khas: wilayah sumbu utama arus Arlindo dengan vektor arus yang kuat ke arah baratdaya dan selatan. Wilayah sumbu Arlindo ini berada di sebelah timur dari garis bujur 115.5°BT atau ke arah timur dari Selat Lombok. Orientasi sumbu Arlindo adalah timurlaut-baratdaya yang sebagian arusnya mengarah ke Selat Lombok menjadi Arlindo Lombok, namun sebagian lagi bercabang ke arah timur, yang berlanjut menyusuri Laut Flores bagian selatan (Gambar 4). Lebar sumbu Arlindo Flores di kedalaman 25 m adalah lebih dari 120 km. Arlindo Flores membawa massa air dengan suhu yang relatif dingin. Distribusi suhu di kedalaman 25 m di bagian barat Laut Flores menunjukkan kisaran suhu antara 28°C-29°C, tetapi di sepanjang sumbu arus Arlindo distribusi suhu berkisar 27,8°C-28,5°C (Gambar 4).

Wilayah pusaran arus yang berputar berlawanan arah jarum jam (*anti-cyclonic eddy*) yang berada di Laut Bali antara Pulau

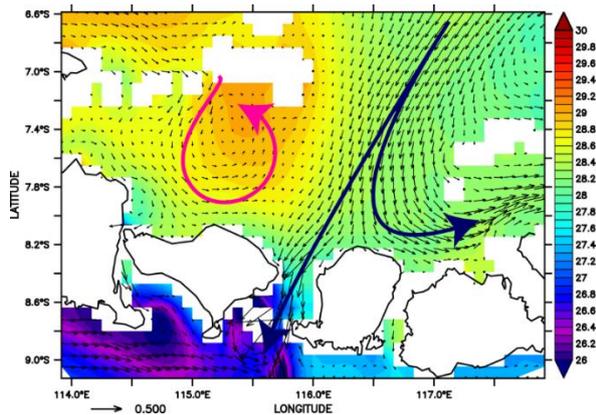
Bali dan Kangean, dimana diameter *eddy* sekitar 100 km (Gambar 4). Suhu di wilayah cincin *eddy* di Laut Bali relatif lebih hangat sekitar 28,5°C. Sebagai acuan perbandingan, sebaran suhu di wilayah Selatan Jawa-Bali mencapai minimum s-kitar 25°C yang berasosiasi dengan siklus upwelling musiman yang berlangsung dalam periode Musim Tenggara (Susanto *et al.*, 2000; Kuswardani *et al.*, 2015).

Di Laut Flores bagian barat, rerata aliran utama Arlindo Flores dan Arus Monsun Jawa adalah ke arah selatan dengan besaran kecepatan arus Arlindo sekitar 0.5 m/s dan sebagian keluar menuju Samudera Hindia melalui Selat Lombok, serta sebagian berbelok menuju Laut Flores bagian timur. Sekitar 20% massa air dari Arlindo Flores yang bersumber dari Arlindo Makassar keluar melalui Selat Lombok dan selebihnya diteruskan ke Laut Flores dan Laut Banda (Murray dan Arief, 1988).

Gaya penggerak utama aliran Arlindo pada lapisan 0-200 meter adalah karena adanya perbedaan tekanan permukaan laut yang kuat antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia, sehingga aliran arus sepanjang tahun mengalir ke selatan (Gordon *et al.*, 1994). Selain itu, arus dari Laut Jawa yang memasuki perairan Bali ikut keluar melalui Selat Lombok dengan besaran kecepatan arus sekitar 0.25 m/s. Arus dari Laut Jawa yang memasuki perairan Laut Bali mengalami perputaran arus yang berlawanan arah jarum jam. Hal ini diduga karena pengaruh topografi pulau yaitu eksistensi dari Pulau Bali dan Pulau Kangean (lihat Gambar 1) serta adanya interaksi aliran arus yaitu bertemu dengan arus kuat Arlindo (Gambar 4).

3.2. Siklus Tahunan Sirkulasi Laut

Siklus tahunan sirkulasi laut di wilayah studi dalam periode Musim Baratlaut (Des-Feb) dicirikan oleh vektor arus ke arah timur yang membawa massa air relatif hangat dari Laut Jawa pada kisaran suhu 28,9-30°C, sedangkan suhu di Lau Flores bagian barat



Gambar 4. Rerata vektor arus di level kedalaman 25 m yang ditumpang-susunkan dengan suhu air laut dari hasil simulasi model INDESO (2008–2014). Pola sirkulasi laut dicirikan oleh dua wilayah arus yang khas: Arlindo Flores (panah biru) yang bercabang menjadi Arlindo Lombok dan sebagian cabang arus mengalir ke timur, dan pusaran arus anti-siklonik di Belahan Bumi Selatan (BBS) (panah merah).

cenderung lebih rendah yaitu sekitar 28–29°C (Gambar 5a). Hal ini disebabkan pada Musim Baratlaut, massa air di Laut Jawa berasal dari Laut Cina Selatan melewati Selat Karimata mempunyai suhu yang tinggi (Qu dan Lukas 2003; Qu *et al.* 2004). Massa air utama bergerak dari Laut Jawa dan Selat Makassar menuju ke Laut Flores bagian timur dan sebagian keluar melalui Selat Lombok.

Bulan Januari, massa air dari Laut Jawa mengalami kelokan dari Laut Bali hingga ke Laut Flores bagian timur (Gambar 5a). Selain itu juga arus dari Laut Jawa yang memasuki Laut Bali mengalami resirkulasi akibat eksistensi dari pulau Bali. Resirkulasi arus di Laut Bali ini berputar searah jarum jam di BBS (*cyclonic eddy*), ditunjukkan dengan panah hijau tua). Selain di Laut Bali, resirkulasi arus searah jarum jam juga terbentuk di sebelah utara Selat Lombok. Resirkulasi arus ini diduga terbentuk akibat adanya pertemuan massa air dari Laut Jawa

yang berkelok menuju ke Laut Flores dengan massa air yang masuk melalui Selat Lombok dari Samudera Hindia, sedangkan pada bulan Februari resirkulasi arus sudah menghilang dan kecepatan arus utama dari Laut Jawa dan Selat Makassar semakin tinggi (Gambar 5a).

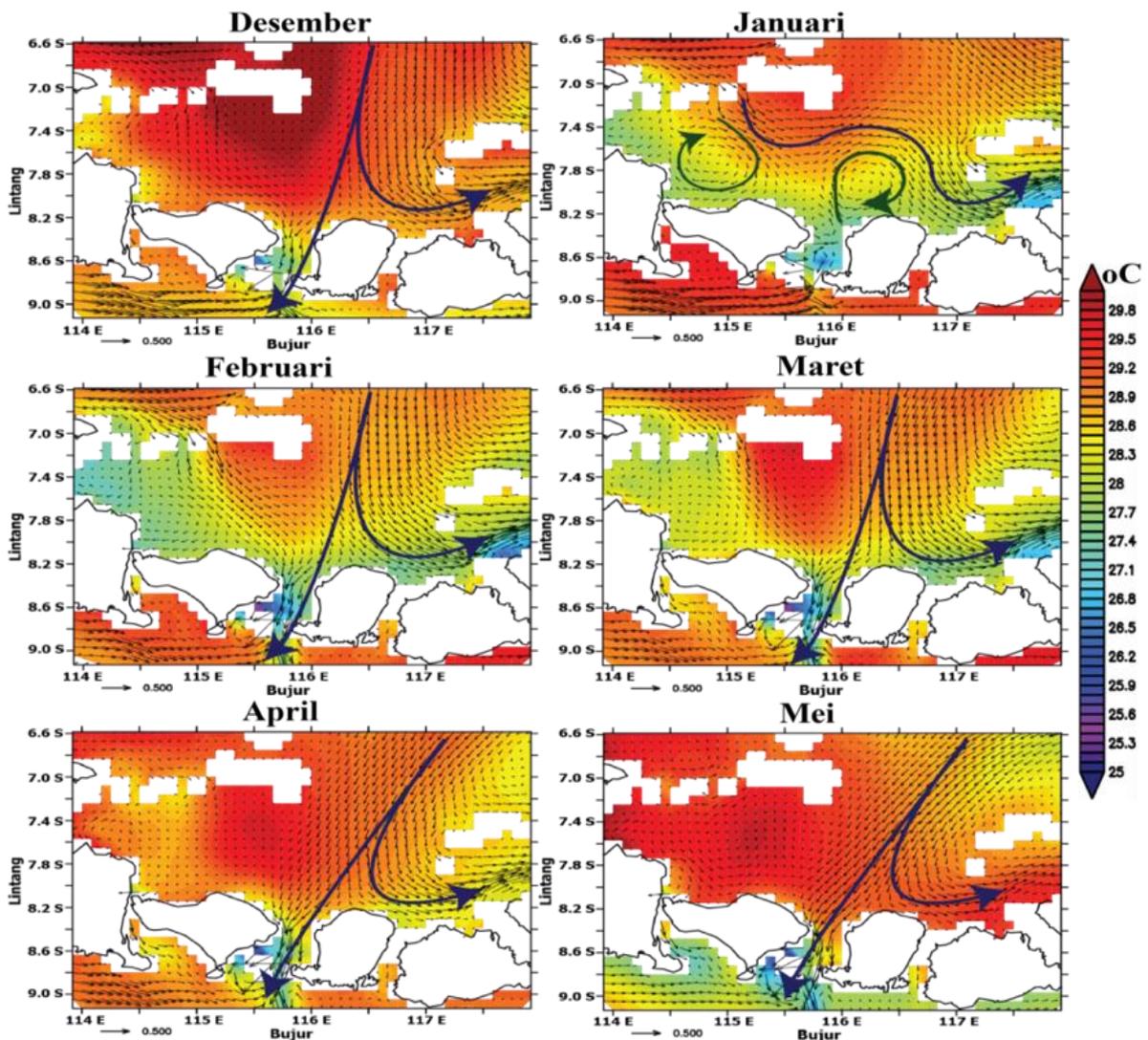
Musim peralihan I (Maret, April, Mei), distribusi suhu hangat di Laut Bali mengalami perluasan dan peningkatan nilai suhu yang berkisar dari 29,2–30°C. Tetapi suhu pada jalur arus utama Arlindo relatif dingin berkisar dari 28–28,6°C. Pada bulan April dan Mei, di tengah Laut Bali bagian utara terlihat adanya cincin suhu yang lebih hangat dibandingkan sekitarnya. Kecepatan arus utama dari Arlindo Flores semakin tinggi menuju bagian selatan Laut Flores dan sebagian keluar menuju Samudera Hindia melalui Selat Lombok. Pada musim peralihan ini, kecepatan arus Arlindo semakin kuat sedangkan Arus Muson dari Laut Jawa mengalami pelemahan. Hal ini disebabkan karena arah tiupan angin Muson berganti dari baratlaut menjadi tenggara (Wyrтки 1961).

Periode Musim Tenggara (Juni, Juli, Agustus) distribusi suhu juga mengalami penurunan. Kisaran suhu pada jalur arus utama Arlindo berkisar dari 26,5 – 27,4°C, sedangkan di Laut Bali kisaran suhu antara 27,5–28,3°C (Gambar 5b). Nilai suhu terendah berada di wilayah Selatan Jawa dengan rentang suhu dari 25–26°C. Studi sebelumnya (misalnya Wyrтки, 1961; Susanto *et al.*, 2001; Purba, 2007) pada Musim Tenggara wilayah Selatan Jawa merupakan wilayah *upwelling* yang menyebabkan suhu di Selatan Jawa menjadi sangat rendah. Pada Musim Tenggara juga mulai terbentuk pusaran arus berlawanan arah jarum jam (*anti-cyclonic eddy*) di Laut Bali, dimana cincin suhu memiliki inti yang lebih hangat dibandingkan sekitarnya. Menurut Stewart (2002) pusaran arus yang berputar berlawanan arah jarum jam di Belahan Bumi Selatan berimplikasi dengan massa air di cincin pusaran yang lebih hangat dibandingkan sekeliling luarnya.

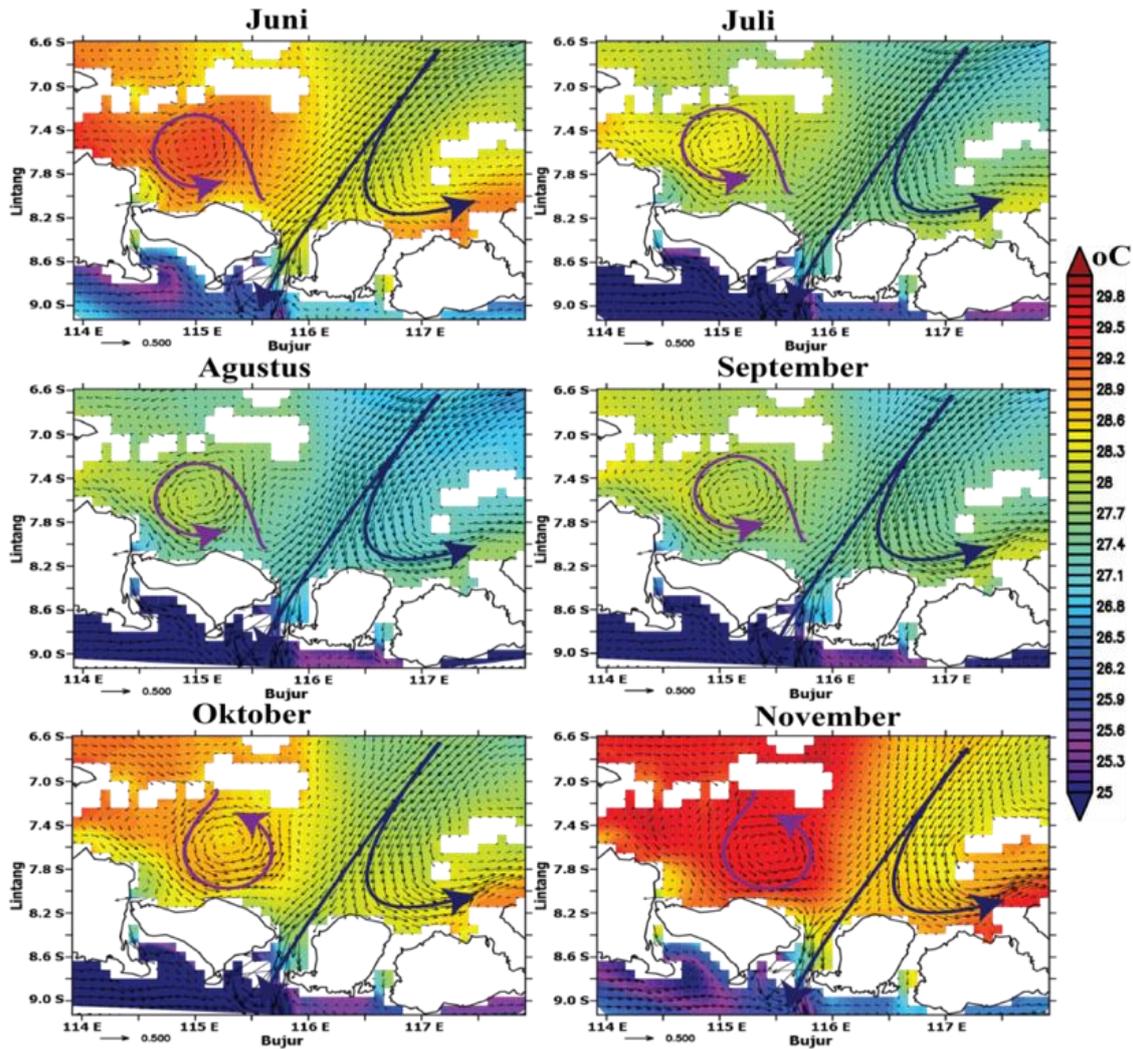
Kekuatan arus dari Arlindo Flores pada Musim Tenggara semakin intensif,

hingga mencapai besaran kecepatan arus 0,5 m/s yang secara kontinu bergerak keluar melalui Selat Lombok dan sebagian berbelok menuju Laut Flores bagian timur (Gambar 5b). Arus utama Arlindo yang mengalir dalam Musim Tenggara menunjukkan vektor arus yang lebih kuat jika dibandingkan dengan arus dalam Musim Baratlaut. Hal ini berimplikasi bahwa volume transpor Arlindo lebih besar dalam Musim Tenggara (Jun-Sep) dibandingkan dengan transpor dalam Musim Baratlaut (Des-Feb), yang sesuai dengan penelitian sebelumnya (Gordon dan Susanto, 2003; Sprintall *et al.*, 2009).

Musim peralihan II (Sep - Nov), kecepatan arus utama Arlindo Flores mengalami pelemahan (Gambar 5b). Hal ini disebabkan berbaliknya arah angin Muson Tenggara menjadi angin Baratlaut, sehingga transpor Ekman menuju ke arah utara (Wyrtki, 1961). pusaran arus di Laut Bali masih terlihat hingga musim peralihan II berakhir. Distribusi suhu perairan mulai menghangat akibat adanya masukan massa air hangat dari Laut Jawa ke Laut Bali dengan kisaran suhu sebesar 26,5-29,5°C (Gambar 5b).



Gambar 5a. Siklus tahunan sirkulasi laut dari rata-rata bulanan 2008-2014, ditunjukkan oleh vektor arus dan suhu air laut di level kedalaman 25 m dari bulan Desember sampai bulan Mei.



Gambar 5b. Seperti pada Gambar 5a, tapi untuk bulan Juni hingga bulan November.

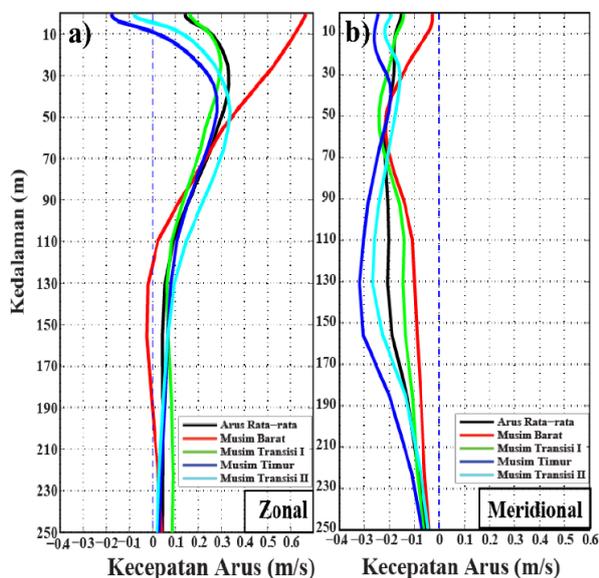
3.3. Karakteristik Struktur Menegak Arlindo Flores dan Arus Pantai Selatan Jawa

Profil menegak dan variasi musiman arus komponen zonal APJS di Selatan Jawa, serta arus komponen meridional (utara-selatan) Arlindo Flores di Laut Flores disajikan pada Gambar 6. Rerata profil arus zonal di Selatan Jawa ditandai dengan kecepatan ke arah timur yang semakin meningkat dari permukaan ke kedalaman sub-permukaan (30 m), kemudian menurun kembali besaran kecepatannya mendekati nilai 0 di kedalaman 120 m (Gambar 6a). Profil arus dengan kecepatan maksimum di kedalaman sub-permukaan dan relatif lemah di permukaan menunjukkan bahwa sistem arus tersebut

tidak langsung digerakkan oleh angin lokal tetapi oleh penggerak dari wilayah lain (*remote forcing*). Variasi musiman profil arus zonal di Selatan Jawa tercatat adanya lonjakan besaran kecepatan arus zonal positif permukaan mencapai 0,6 m/s (ke arah timur) dalam periode Musim Baratlaut. Hal ini sebagai representasi Arus Pantai Selatan Jawa yang terbentuk secara maksimal dalam Musim Baratlaut. Pada musim peralihan I hingga musim peralihan II, komponen arus zonal mengalami penguatan kecepatan hingga mencapai maksimal pada kedalaman 30 meter ke arah timur dan selanjutnya menurun hingga kedalaman 130 meter kemudian relatif lemah dengan kecepatan arus hampir mendekati nol hingga lapisan dalam. Pe-

nguatan komponen arus zonal dari APJS dalam periode musim peralihan berkaitan dengan kehadiran gelombang Kelvin terperangkap pantai (Sprintall *et al.*, 2000).

Profil rerata komponen arus meridional Arlindo Flores (garis hitam) tercatat meningkat dari permukaan ke kedalaman sekitar 70 m, kemudian besaran kecepatannya relatif konstan 0,2 m/s ke arah selatan sampai kedalaman sekitar 160 m (Gambar 6b). Variasi musiman dari profil kecepatan arus Arlindo sangat berfluktuatif, dimana dalam Musim Baratlaut, di lapisan permukaan hingga kedalaman 10 meter kecepatan arus melemah yaitu sekitar 0,05 m/s, kemudian mengalami kenaikan kecepatan hingga 0,3 m/s pada kedalaman 50 meter dan selanjutnya mengalami penurunan seiring bertambahnya kedalaman. Musim Tenggara, kecepatan arus meridional di lapisan permukaan hingga kedalaman 10 meter sekitar 0,3 m/s, kemudian semakin menurun hingga kedalaman 50 meter, selanjutnya semakin meningkat hingga mencapai maksimum pada kedalaman 130 meter dengan kecepatan sekitar 0,3 m/s.



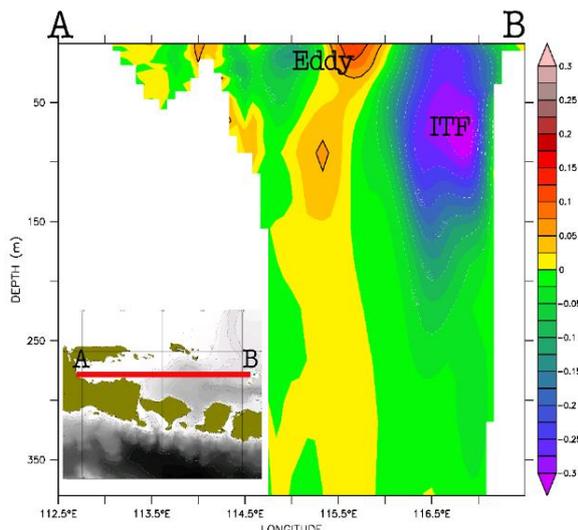
Gambar 6. Profil menegak rerata dan variasi musiman dari (a) komponen arus zonal APJS di Selatan Jawa, dan (b) komponen arus meridional Arlindo Flores.

Struktur menegak dari Arlindo Flores dapat diamati secara detil dari *cross-section* rerata komponen arus meridional (2008-2014) di garis lintang $7,5^{\circ}\text{LS}$, yang memotong dari titik A sampai B (Gambar 7). Rerata arus komponen meridional dicirikan oleh besaran arus yang kuat ke arah selatan ($>0,3$ m/s) di dalam gumpalan (*core*) Arlindo Flores di sebelah timur dari bujur $116,6^{\circ}\text{BT}$ dan kedalaman sekitar 50 m - 100 m. Ukuran Arlindo Flores di lintang $7,5^{\circ}\text{LS}$ ini adalah lebar sekitar 112 km, ketebalan arus dari permukaan laut sampai kedalaman sekitar 250 m, dimana terjadi intensifikasi di tepi barat Kepulauan Sailus Pangkajene atau di sekitar garis bujur 117°BT (Gambar 7).

Luasan penampang menegak Arlindo Flores bervariasi secara musiman, dimana ukurannya menjadi lebih luas dengan besaran arus meridional yang lebih kuat dalam Musim Tenggara dibandingkan dengan luasan Arlindo dalam Musim Baratlaut. Periode Musim Baratlaut, besaran komponen arus meridional mencapai 0,26 m/s pada lapisan permukaan dan semakin melemah hingga kecepatannya mencapai 0,02 m/s pada kedalaman 220 meter. Musim Tenggara, kecepatan arus di lapisan permukaan mencapai 0,3 m/s dan semakin berkurang seiring bertambahnya kedalaman hingga kecepatannya mencapai 0,04 m/s pada kedalaman 220 meter, sehingga luasan penampang Arlindo Flores dalam Musim Baratlaut adalah 29×10^6 km², sedangkan dalam Musim Tenggara sekitar 39×10^6 km² atau 1,3 lebih luas dibandingkan dalam Musim Baratlaut. Berdasarkan perhitungan integrasi komponen arus meridional antar garis A-B dan antara permukaan sampai kedalaman 380 m, diperoleh rerata volume transpor Arlindo Flores ($Q_{V\text{-A-B}}$) sekitar $-4,95 (\pm 1,11)$ Sv (1 Sverdrup (Sv) = 10^6 m³/detik). Sumbu utama Arlindo Flores ini bercabang di sisi utara Pulau Lombok/Sumbawa, dimana satu cabang mengalir ke Samudera Hindia via Selat Lombok, dan satu cabang berlanjut ke timur menyusuri sisi selatan laut Flores. Hasil perhitungan volume transpor yang

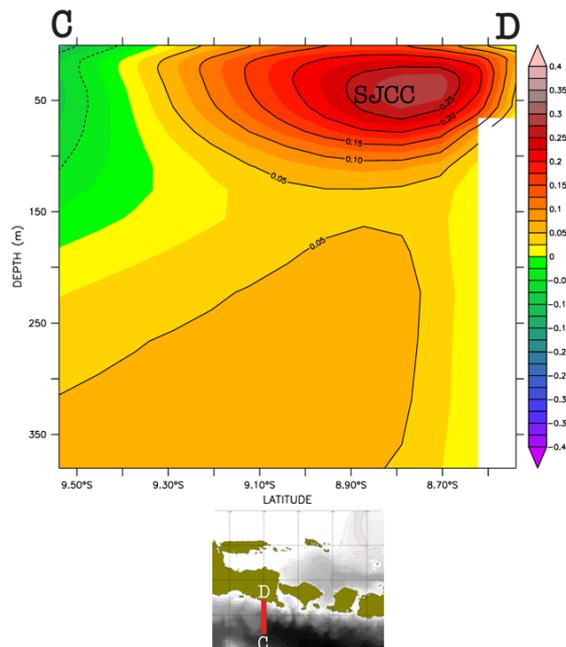
masuk Selat Lombok diperoleh nilai rerata volume transpor Arlindo Lombok sekitar $-2,92 (\pm 0,94)$ Sv, sehingga selisih kedua rerata transpor tersebut yang berlanjut ke timur menyusuri selatan Laut Flores adalah sekitar 2 Sv. Hasil estimasi transpor Arlindo Lombok dari model INDES0 ini cukup dekat hasilnya dengan estimasi pengukuran lapang antara $-2,045$ (Musim Barat laut) dan $-3,87$ Sv (Musim Tenggara) (Sprintall *et al.*, 2009).

Selain struktur menegak Arlindo Flores, rona yang unik dari penampang komponen arus meridional di garis lintang $7,5^\circ\text{LS}$ adalah terbentuknya arus meridional ke arah utara (positif) dan ke arah selatan (negatif) di garis bujur $114,5 - 116^\circ\text{BT}$ pada kedalaman antara permukaan dan 50 m (Gambar 7). Dari uraian sub-bab sebelumnya (Gambar 4), pola arus meridional yang mengarah ke selatan dan utara tersebut merupakan bagian dari pusaran arus (*eddy*) yang berputar berlawanan arah jarum jam. Pusaran arus *anti-cyclonic* di BBS ini diduga terbentuk sebagai respon terhadap *shear* kuat Arlindo Flores ke arah selatan di tepi batasnya, sehingga terdapat arus-umpan ke arah utara. Perlu kajian lebih spesifik untuk mengungkapkan keberadaan *eddy* di Laut Bali ini.



Gambar 7. Penampang menegak komponen arus meridional rerata 2008-2014 untuk Arlindo Flores dari keluaran model INDES0 pada lintang $7,5^\circ\text{S}$ (garis A-B) di Laut Flores.

Penampang melintang komponen arus zonal dari Arus Pantai Selatan Jawa (APJS) antara titik C dan D (Gambar 8), ditandai oleh lapisan gumpal (*core*) APJS yang melebar dari pantai ke arah lintang $9,3^\circ\text{LS}$ dan dari permukaan sampai kedalaman sekitar 120 m dan besaran maksimal kecepatan ke arah timur sekitar $0,35$ m/s di kedalaman 50 m. Sistem APJS merupakan sistem arus yang terbentuk di Ekuator Samudera Hindia bagian timur, kemudian mengalir menyusuri pantai sepanjang Barat Sumatera - Selatan Jawa - dan Selatan Kepulauan Sunda Kecil antara selatan Bali sampai Wetar di Selat Ombai (Sprintall *et al.*, 2009). Di bawah kedalaman 150 terdapat batas atas arus lainnya, yang dikenal dengan *South Java Coastal Under Current* (SJCUC) dimana gumpal SJCUC berada di kedalaman sekitar 450 m (Iskandar *et al.*, 2006). Dinamika dari APJS diduga mempengaruhi Arlindo Lombok dengan adanya intrusi arus ke arah utara di Selat Lombok.



Gambar 8. Penampang melintang komponen arus zonal rerata 2008-2014 untuk Arus Pantai Selatan Jawa (APJS) dari keluaran model INDES0 di bujur 114°E (garis C-D) Selatan Jawa.

Analisis koherensi dari fluktuasi transpor APJS dengan transpor Arlindo Flores akan dibahas pada sub-bab 3.4. Estimasi rerata volume transpor APJS dari hasil perhitungan integrasi komponen arus zonal pada garis lintang C-D dan kedalaman 0 sampai 380 m, diperoleh nilai sekitar 2,65 ($\pm 5,16$) Sv. Nilai simpangan baku dari transpor APJS sangat tinggi, yang berarti terjadi fluktuasi transpor sekitar 5 Sv dalam rentang musim yang berbeda.

3.4. Variabilitas Transpor Arlindo Flores dan Arus Pantai Selatan Jawa

Data deret-waktu volume transpor Arlindo Flores dari Januari 2008 sampai Desember 2014 menunjukkan kisaran fluktuasi transpor dalam rentang antara -6,5 Sv sampai -2 Sv, dengan nilai reratanya sekitar -4,95 Sv dan simpangan baku sekitar 1,11 Sv (Gambar 9a). Secara konsisten, deret-waktu transpor Arlindo Flores menunjukkan tanda negatif, yang berarti arah transpor selalu ke selatan. Transpor Arlindo maksimum ke arah selatan (6,5 Sv) terjadi dalam periode Musim Tenggara, sebaliknya transpor Arlindo mengalami pelemahan menjadi sekitar -2 Sv (ke arah selatan) dalam periode Musim Barat laut. Pelemahan transpor Arlindo ini diduga terjadi sebagai respon dari laut terhadap transpor Ekman di dekat permukaan yang mengarah ke utara, serta adanya intrusi atau pembalikan arus ke arah utara dari kedatangan gelombang Kelvin yang masuk via Selat Lombok (Sprintall *et al.*, 2009). Gelombang Kelvin yang masuk melalui Selat Lombok dapat membalikkan arah arus ke utara atau melemahkan transpor Arlindo (Sprintall *et al.*, 2009). Secara visual fluktuasi transpor Arlindo Flores menunjukkan periode fundamental tahunan. Hal ini berarti variasi tahunan transpor menjadi dominan di wilayah ini. Selain itu, fluktuasi yang kuat kedua dari transpor Arlindo terjadi dalam periode beberapa bulan yang muncul di akhir/awal tahun (Gambar 9a).

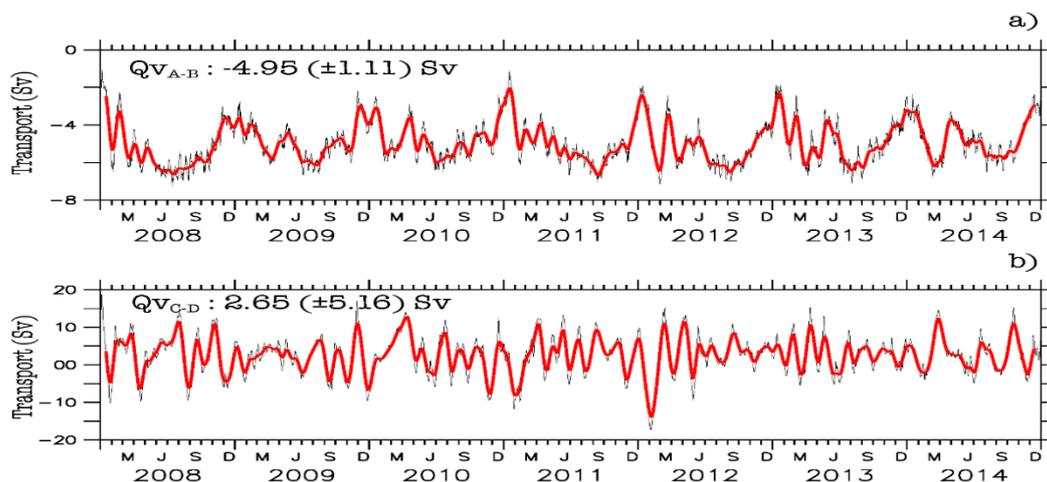
Di wilayah Selatan Jawa, deret-waktu volume transpor APJS menunjukkan fluktuasi dengan rentang *amplitude* yang tinggi antara -10 Sv (ke arah barat) sampai +15 Sv (ke arah timur), dengan rerata sekitar 2,65 Sv dan nilai simpangan bakunya sekitar 5,16 Sv (Gambar 9b). Secara visual, fluktuasi transpor APJS didominasi oleh fluktuasi dalam periode intra-musiman. Hal ini berbeda dengan pola fluktuasi transpor Arlindo Flores yang didominasi periode musiman (Gambar 9a). Fluktuasi tahunan yang dominan dari transpor di Arlindo Flores menunjukkan kontribusi penting dari Ekman transport yang dibangkitkan oleh angin Muson. Kontribusi transpor Ekman ini menyebabkan terjadi penguatan Arlindo Flores dalam periode musim Timur karena arah transpor menuju ke Samudera Hindia (selatan), sebaliknya, dalam periode musim Barat arah transpor Ekman ke utara yang dapat mereduksi transpor Arlindo Flores (Susanto *et al.*, 2007; Sprintall *et al.*, 2009). Di sisi Selatan Jawa, pola fluktuasi transpor APSJ terkait erat dengan fluktuasi angin skala intra-seasonal sebagai *remote forcing* dari barat Sumatera dan Ekuator Samudera Hindia yang membangkitkan *coastally trapped Kelvin waves* (Iskandar *et al.*, 2006);, serta wilayah dinamis pusaran arus (*eddies*) yang berasal dari keluaran Arlindo (*throughflow eddies*) (Nof *et al.*, 2002; Feng and Wijffels, 2002).

Analisis deret-waktu dengan metode *continuous wavelet transform* (CWT) untuk data transpor Arlindo Flores dan APJS (2008-2014) yang disajikan pada Gambar 9 di atas, menunjukkan 3 periodisitas utama, yaitu variabilitas transpor dalam skala-waktu intra-seasonal 20-90 hari (biasanya disebut ISV), variabilitas skala-waktu *semi-annual* 180 hari (disebut SAV) dan variabilitas skala-waktu *annual* 360 hari (disebut AV) (Gambar 10). Di wilayah Arlindo Flores (Gambar 10a) hasil analisis CWT menunjukkan variabilitas transpor di wilayah ini didominasi oleh fluktuasi pada skala-waktu AV atau tahunan yang membentang dari awal deret-waktu 2008 sampai 2014, dimana

variasi nilai koefisien wavelet terhadap waktu relatif kecil. Periodisitas kedua terbesar dari fluktuasi transpor Arlindo Flores terjadi pada skala-waktu SAV, dimana pada 3 tahun terakhir (2012-2014) nilai koefisien CWT lebih tegas dibandingkan dengan tahun sebelumnya (Gambar 10a), yang diduga terkait dengan variasi transport skala antartahunan. Variabilitas transpor Arlindo Flores dalam skala ISV dicirikan oleh nilai koefisien CWT yang tinggi tapi sporadik terjadi di awal tahun, seperti pada Jan-Feb 2008, 2010, 2011, 2012, dan 2013, dimana nilai koefisien CWT yang tertinggi terjadi pada awal tahun 2008 dan 2012. Nilai koefisien CWT yang tinggi dan sporadik di awal tahun ini berasosiasi dengan puncak pelemahan transpor Arlindo yang terjadi di awal tahun (lihat Gambar 9a). Menurut Sprintall *et al.* (2009), pembalikan arah arus ke utara di Selat Lombok sering terjadi di akhir tahun dan awal tahun, yang terkait dengan intrusi kedatangan gelombang Kelvin dari Samudera Hindia, dimana gelombang Kelvin ekuator yang terbentuk dalam musim peralihan di wilayah ekuator Samudera Hindia memerlukan waktu perambatan beberapa bulan untuk tiba di sekitar Selat Lombok (Sprintall *et al.*,

2000). Deret-waktu volume transpor Arlindo Flores dikalkulasi dari integrasi arus kedalaman 380 m sampai permukaan, maka pelemahan transpor ini hanya mencapai transpor minimum sekitar 2 Sv, tetapi arah transpor masih ke arah selatan. Namun, deret-waktu komponen arus meridional dekat permukaan mengalami pembalikan arah ke utara pada waktu munculnya signal gelombang Kelvin (tidak ditampilkan).

Analisis deret-waktu dengan metode *continuous wavelet transform* (CWT) untuk data transpor Arlindo Flores dan APJS (2008-2014) yang disajikan pada Gambar 9 di atas, menunjukkan 3 periodisitas utama, yaitu variabilitas transpor dalam skala-waktu intra-seasonal 20-90 hari (biasanya disebut ISV), variabilitas skala-waktu *semi-annual* 180 hari (disebut SAV) dan variabilitas skala-waktu *annual* 360 hari (disebut AV) (Gambar 10). Di wilayah Arlindo Flores (Gambar 10a) hasil analisis CWT menunjukkan variabilitas transpor di wilayah ini didominasi oleh fluktuasi pada skala-waktu AV atau tahunan yang membentang dari awal deret-waktu 2008 sampai 2014, dimana variasi nilai koefisien wavelet terhadap waktu relatif kecil.



Gambar 9. Data deret-waktu volume transpor 2008-2014 (garis hitam) dengan *smoothing* bulanan (garis merah) untuk (a) Arlindo di Laut Flores (transek A-B), dan (b) Arus Pantai Selatan Jawa (APJS) di Selatan Jawa (transek C-D). (Catatan: 1 Sverdrup, Sv = 10^6 m³/s; tanda negatif menunjukkan arah transpor Arlindo (APJS) ke selatan (barat).

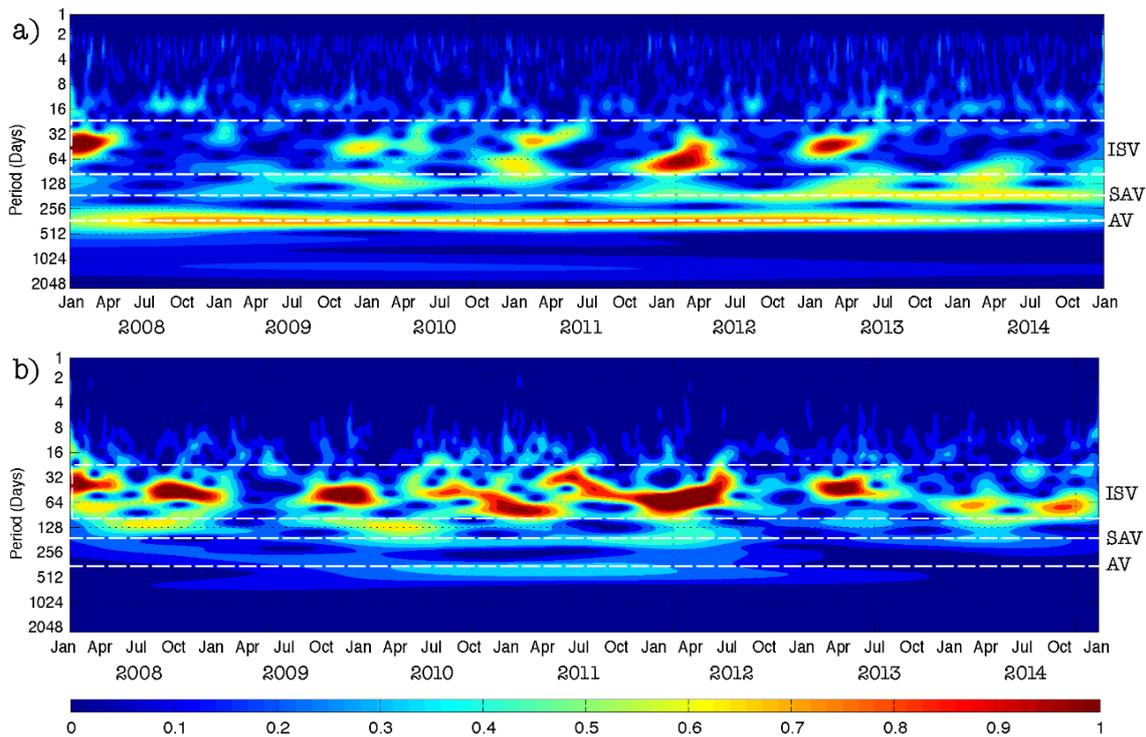
Periodisitas kedua terbesar dari fluktuasi transpor Arlindo Flores terjadi pada skala-waktu SAV, dimana pada 3 tahun terakhir (2012-2014) nilai koefisien CWT lebih tegas dibandingkan dengan tahun sebelumnya (Gambar 10a), yang diduga terkait dengan variasi transport skala antartahunan. Variabilitas transpor Arlindo Flores dalam skala ISV dicirikan oleh nilai koefisien CWT yang tinggi tapi sporadik terjadi di awal tahun, seperti pada Jan-Feb 2008, 2010, 2011, 2012, dan 2013, dimana nilai koefisien CWT yang tertinggi terjadi pada awal tahun 2008 dan 2012. Nilai koefisien CWT yang tinggi dan sporadik di awal tahun ini berasosiasi dengan puncak pelemahan transpor Arlindo yang terjadi di awal tahun (lihat Gambar 9a). Menurut Sprintall *et al.* (2009), pembalikan arah arus ke utara di Selat Lombok sering terjadi di akhir tahun dan awal tahun, yang terkait dengan intrusi kedatangan gelombang Kelvin dari Samudera Hindia, dimana gelombang Kelvin ekuator yang terbentuk dalam musim peralihan di wilayah ekuator Samudera Hindia memerlukan waktu perambatan beberapa bulan untuk tiba di sekitar Selat Lombok (Sprintall *et al.*, 2000). Karena deret-waktu volume transpor Arlindo Flores dikalkulasi dari integrasi arus kedalaman 380 m sampai permukaan, maka pelemahan transpor ini hanya mencapai transpor minimum sekitar 2 Sv, tetapi arah transpor masih ke arah selatan. Namun, deret-waktu komponen arus meridional dekat permukaan mengalami pembalikan arah ke utara pada waktu munculnya signal gelombang Kelvin (tidak ditampilkan).

Variabilitas transpor APJS ternyata didominasi oleh fluktuasi pada skala-waktu ISV (20-90 hari), dan variabilitas skala-waktu SAV dan AV muncul sebagai skala-waktu kedua (Gambar 10b). Hal ini kontras dengan pola variabilitas Arlindo Flores, dimana periodisitas skala-waktu AV yang dominan (Gambar 10a). Nilai koefisien CWT yang tinggi pada periodisitas ISV di Selatan Jawa sering muncul di dalam periode transisi,

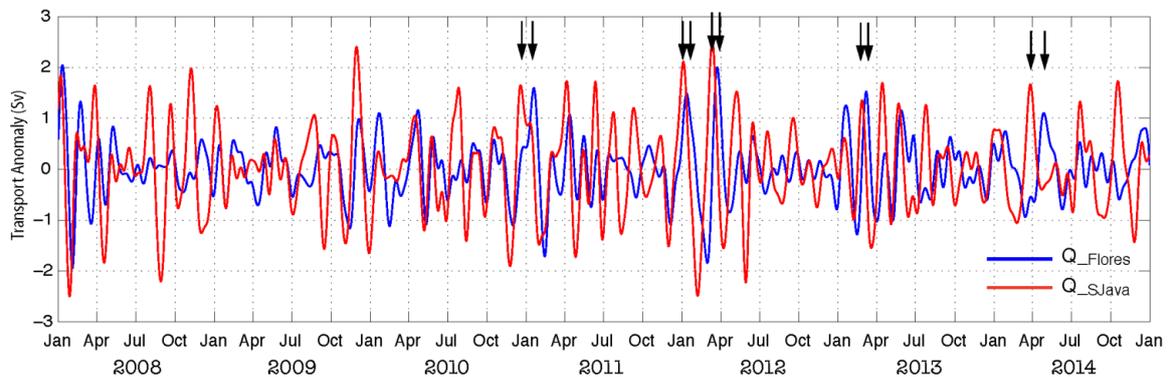
baik transisi 1 (Maret-Mei) maupun transisi 2 (September-November). Nilai koefisien CWT yang paling kuat dan panjang muncul dalam rentang waktu dari Juli 2011 sampai Juli 2012. Fluktuasi transpor APJS dalam skala ISV yang sering muncul dalam periode transisi yang terungkap dalam kajian ini, adalah cukup konsisten dengan kajian sebelumnya mengenai variabilitas arus di kawasan Selatan Jawa (misalnya Iskandar *et al.*, 2005; Sprintall *et al.*, 2009). Variabilitas transpor APJS dalam skala ISV di Selatan Jawa dibangkitkan oleh *remote forcing* gelombang Kelvin ekuator Samudera Hindia yang merambat di sepanjang Barat Sumatera - Selatan Jawa, dimana intrusi gelombang Kelvin ke Selat Lombok ini dapat mempengaruhi Arlindo Lombok dalam skala ISV (Arief dan Murray 1996; Qiu *et al.* 1999; Pujiana *et al.*, 2013).

Variabilitas transpor Arlindo Flores dan transpor APJS dari hasil analisis CWT (Gambar 10) dicuplik pada skala ISV dengan metode *band-pass filter* (periode *cut-off* 20-120 hari) untuk mengamati secara detail kedua fluktuasi transpor dalam skala ISV tersebut, serta mengidentifikasi perbedaan fasenya (Gambar 11). Amplitude fluktuasi transpor APJS umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan transpor Arlindo, kecuali di awal tahun 2008, 2011, 2012 dan 2013 yang mana amplitudanya hampir sama (Gambar 11). Lebih jauh, secara visual terlihat bahwa fluktuasi transpor APJS (grafik merah) menunjukkan fase signal yang mendahului dari transpor Arlindo Flores (grafik biru). Misalnya, pada bulan Januari 2011, Jan-Apr 2012, dan Jan-April 2014 fase signal transpor APJS (merah) mendahului transpor Arlindo Flores. Perbedaan fase ini menunjukkan bahwa fluktuasi transpor Arlindo Flores pada skala ISV tertinggal oleh fluktuasi APJS berasal dari Selatan Jawa.

Parambatan signal arus dari Selatan Jawa yang masuk ke Laut Flores via Selat Lombok mekanismenya dapat dijelaskan melalui propagasi gelombang Kelvin, seperti telah diungkap oleh beberapa peneliti



Gambar 10. Hasil analisis *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dari (a) deret-waktu volume transpor Arlindo di Laut Flores, dan (b) deret-waktu volume transpor APJS di Selatan Jawa. Garis putih putus-putus menunjukkan skala-waktu variabilitas: *Intra-Seasonal Variability* ISV (20-90 harian), *Semi-Annual Variability* SAV (180 harian), dan *Annual Variability* AV (360 harian).



Gambar 11. Deret-waktu anomali volume transpor dari hasil penapisan lolos-pita (*band-pass filter*) 20-120 hari *cut-off* dari transpor Arlindo di Laut Flores (biru), dan volume transpor APJS di Selatan Jawa (merah).

sebelumnya (Sprintall *et al.*, 2001; Syamsudin *et al.*, 2004; Pujiana *et al.*, 2013). Angin zonal di tengah ekuator Samudera Hindia (70-90 °BT) besaran kecepatannya terjadi lonjakan yang drastis ke arah timur

(*westerly winds bursts*) dalam periode musim Transisi 1 (Maret-Mei) dan musim Transisi 2 (September-November). Hal ini membangkitkan arus ekuator yang kuat (*equatorial Jet*) ke arah timur (Wyrтки 1973). Akibat

hembusan angin yang kuat ini, terbentuk gelombang Kelvin ekuator, yang selanjutnya menjadi gelombang Kelvin terperangkap pantai (*coastally trapped Kelvin waves*) yang merambat di sepanjang Barat Sumatera, Selatan Jawa - Bali hingga Ombai, dan sebagian dapat lolos masuk ke Makassar via Selat Lombok (misalnya Sprintall *et al.*, 2010). Gelombang Kelvin skala ISV mempunyai kisaran periode dari 35 – 90 hari dan muncul pada bulan November/Desember dan Maret – Mei (Syamsudin *et al.*, 2004).

3.5. Koherensi Transpor Arlindo Flores dan Transpor Arus Pantai Selatan Jawa

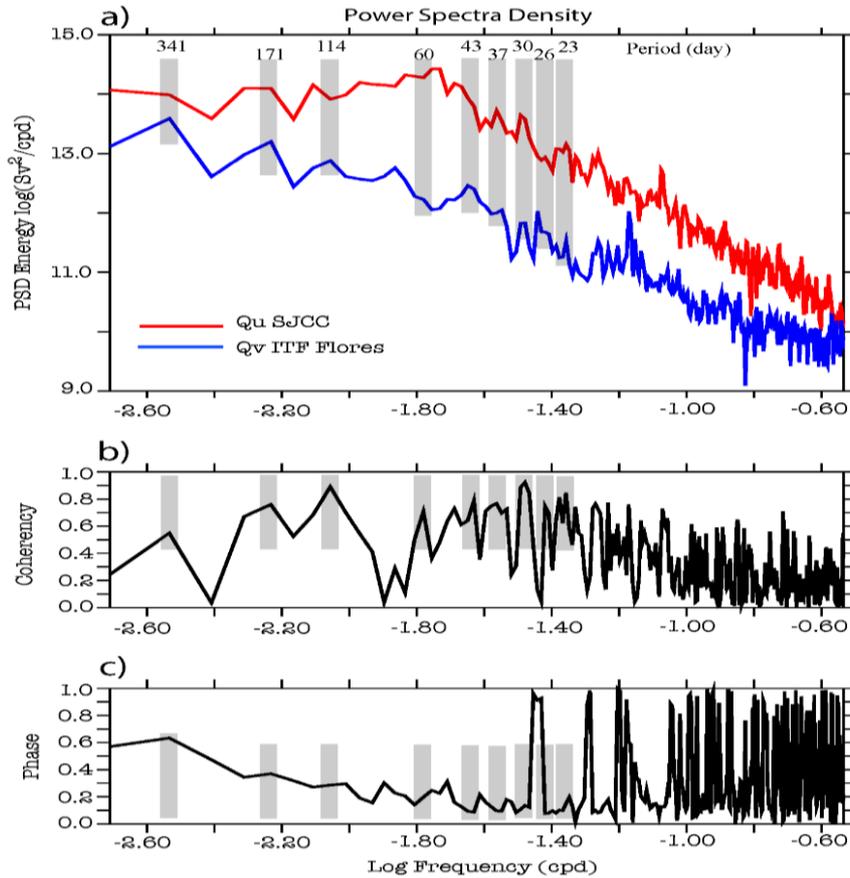
Hasil analisis *cross-PSD* dengan panjang penggalan data deret-waktu (*segment length*) 1024, antara dua variabel deret-waktu transpor Arlindo Flores dengan transpor APJS disajikan pada Gambar 12. Konsisten dengan hasil analisis CWT (Gambar 10), puncak-puncak energi spektral dari fluktuasi APJS dan Arlindo Flores berada pada periode tahunan, semi-tahunan dan rentang intra-seasonal (Gambar 12a). Nilai amplitudo energi spektra dari deret waktu APJS (merah) jauh lebih kuat dibandingkan dengan energi amplitudo Arlindo Flores (biru), yang mencerminkan fluktuasi transpor APJS lebih dinamis dibandingkan dengan transpor Arlindo Flores. Seperti analisis CWT sebelumnya, puncak energi pada periode tahunan (diekspresikan dengan nilai periode 341 harian) di ITF Flores tercatat jauh lebih kuat dibandingkan APJS, tetapi untuk periode semi-tahunan fluktuasi kedua variabel menunjukkan puncak spektral energi yang kuat. Rentang skala periode intra-musiman (20-90 harian) puncak energi spektral di APJS terjadi pada periode sekitar 60 harian. Puncak energi spektral untuk model arus zonal dari APJS juga ditemukan di perairan Selatan Jawa (Iskandar *et al.*, 2006).

Beberapa puncak energi spektra yang muncul di kedua deret-waktu (APJS dan Arlindo Flores) pada periode tertentu

(Gambar 12a, ditandai pita abu-abu vertikal) dapat menunjukkan korelasi dari kedua fluktuasi deret-waktu tersebut, yang dikenal dengan koherensi (Gambar 12b) dan beda fase (mendahului atau tertinggal) dari satu variabel deret-waktu terhadap deret-waktu lainnya (Gambar 12c). Pada skala tahunan dan semi-tahunan, nilai koherensi tercatat masing-masing sekitar 0,55 dan 0,76 dengan beda fase sebesar 34,4 hari dan 10,1 hari, dimana signal arus APJS mendahului dari pada di Arlindo Flores. Terdapat nilai koherensi yang tinggi (0.89) yang terjadi pada periode 114 harian. Skala waktu variabilitas sekitar 4 bulanan ini di luar dari skala waktu intra-musiman yang lazim didefinisikan dari 20 sampai 90 harian. Untuk sementara, periodesitas 114 harian dikelompokkan ke dalam skala-waktu intra-musiman (Tabel 1).

Koherensi yang tinggi dengan *significant level* $>0,5$ pada skala-waktu ISV 20-90 hari terjadi pada beberapa periode, yaitu 23, 26, 30, 37, 43, dan 60 hari (Gambar 12bb, dan Tabel 1). Nilai koherensi yang paling tinggi (0.92) terjadi pada periode 30 hari, dengan beda fase (+0.6 hari). Hal ini berarti fluktuasi signal APJS pada periode 30 harian muncul terlebih dahulu di transek C-D di sisi Selatan Jawa dan 0,6 hari kemudian propagasi signal tersebut muncul di transek A-B Arlindo Flores.

Nilai koherensi pada skala-waktu intra-musiman umumnya $>0,7$ dengan beda fase berkisar antara 0,3 sampai 5,2 hari, dimana signal di APJS mendahului dari pada signal di Arlindo Flores (Tabel 1). Propagasi signal APJS pada skala intra-musiman dari transek C-D yang merambat masuk ke wilayah Arlindo Flores di transek A-B membutuhkan waktu antara 0,3 hari sampai 5.2 hari. Hal ini mengindikasikan adanya intrusi arus yang mengalir dari Selatan Jawa sisi Samudera Hindia menuju Laut Flores bagian barat melalui Selat Lombok yang terkait dengan kedatangan Gelombang Kelvin pada selang intra-musiman (ISV).



Gambar 12. (a) Energi spektra dari deret-waktu transpor APSJ (merah) dan Arlindo Flores (biru), (b) nilai koherensi dan (c) beda fase antara kedua deret-waktu tersebut.

Tabel 1. Koherensi dan fase antara variabilitas transpor APSJ dengan Arlindo Flores pada skala-waktu tahunan, semi-tahunan, dan intra-musiman.

No.	Period (day)	Skala-Waktu	Coherency	Phase (hari)
1	341	Tahunan	0,55	34,4
2	171	Semi-tahunan	0,76	10,1
3	114	Intra-musiman	0,89	5,2
4	60		0,71	1,9
5	43		0,79	0,6
6	37		0,77	0,6
7	30		0,92	0,6
8	26		0,75	0,3
9	23		0,84	0,6

IV. KESIMPULAN

Pola sirkulasi di bagian barat Laut Flores dicirikan oleh dua wilayah arus yang unik, yakni sumbu arus kuat Arlindo Flores yang mengalir ke arah baratdaya menuju

Selat Lombok, serta pusaran arus (*eddy*) anti-siklonik di BBS di Laut Bali. Rerata transpor Arlindo Flores kearah selatan di lintang 7,5°LS adalah -4,95 (±1,11) Sv, dengan variasi tahunan transpor mencapai maksimum (6,5 Sv) di musim Tenggara dan

melemah (2 Sv) di musim Barat laut. Bifurkasi (percabangan) Arlindo Flores terjadi di utara lepas pantai Lombok, dimana satu cabang arus $-2,92 (\pm 0,94)$ Sv mengalir ke arah Selat Lombok dan cabang lainnya berlanjut ke timur Laut Flores. Dimensi Arlindo Flores di lintang 5° LS memiliki lebar sumbu arus 112 km, kedalaman arus 250 m, dan arus kuat $>0,3$ m/s ditemukan di kedalaman 50-100 m.

Variabilitas transpor Arlindo Flores didominasi oleh fluktuasi dengan periode fundamental tahunan dan berikutnya semitahunan, dan periode variabilitas intramusiman (ISV), sedangkan variabilitas transpor Arus Pantai Selatan Jawa (APJS) didominasi oleh fluktuasi pada periode ISV, dan semitahunan. Pada rentang skala-waktu ISV, ditemukan koherensi tinggi ($>0,7$) antara fluktuasi transpor APJS dengan transpor Arlindo Flores yang terjadi pada rentang periode 23 hari sampai 114 hari. Koherensi tertinggi (0.92) terjadi pada periode 30 hari dengan beda fase sekitar 0.6 hari dengan signal arus di APJS mendahului dari Arlindo Flores. Hal ini berarti terdapat propagasi signal arus dari APJS yang masuk ke wilayah Flores melalui Selat Lombok.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memfasilitasi penelitian ini. Secara khusus penulis sampaikan terima kasih kepada Pengelola program INDESOS Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) Jakarta, dan INDESOS Project Office di CLS dan Mercator-Océan Toulouse Prancis yang telah memberikan akses keluaran model sirkulasi NEMO dengan konfigurasi INDESOS. Ucapan terima kasih diucapkan kepada Kepala dan para Peneliti Badan Penelitian dan Observasi Laut (BPOL - KKP) di Bali, serta Reviewer yang telah memberikan masukan yang berharga dalam penyempurnaan manuskrip.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmadipoera, A., R. Molcard, G. Madec, S. Wijffels, J. Sprintall, A. Koch-Larrouy, I. Jaya, and A. Supangat. 2009. Characteristics and variability of the Indonesian throughflow water at the outflow straits. *Deep-Sea Res.*, 56:1942-1954.
- Arief, D. and S.P. Murray. 1996. Low frequency fluctuations in the Indonesian Throughflow through Lombok Strait. *J. Geophys Res.*, 101:12455-12464.
- Bendat, J.S. dan A.G. Piersol. 2010. Random data analysis and measurement procedures. 2nd ed. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons. New York. 640p.
- Emery W.J. and R.E. Thomson. 2014. Data analysis methods in physical oceanography. Third Edition. Elsevier, Wyman Street. MA USA. 729p.
- England, M.H. and F. Huang. 2005. On the interannual variability of the Indonesian Throughflow and its linkage with ENSO. *J. Clim.*, 18:1435-1444.
- Feng, M. and S. Wijffels. 2002. Intra-seasonal variability in the South Equatorial Current of the East Indian Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 32:265-277.
- Gordon A.L. 1986. Interocean exchange of thermocline water. *J. Geophys. Res.*, 91:5037-5046.
- Gordon, A.L., A.L. Field, and A.G. Ilahude. 1994. Thermocline of Flores and Banda Sea. *J. Geophys. Res.*, 99:18235-18242.
- Gordon, A.L. and R.A. Fine. 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian Oceans in the Indonesian Seas. *Nature.*, 379:146-149.
- Gordon, A.L. and R.D. Susanto. 2003. Throughflow within Makassar Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 26:3325-3328.
- Hautala, S.L., J. Sprintall, J. Potemra, A.G. Ilahude, J.C. Chong, W. Pandoe, and

- N. Bray. 2001. Velocity structure and transport of the Indonesian Throughflow in the major strait restricting flow into the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 106:19527-19546.
- Ilahude, A.G. dan A. Nontji. 1999. Oseanografi Indonesia dan perubahan iklim global (El-Nino dan La-Nina). Jakarta (ID). LIPI. 13hlm.
- Iskandar, I., T. Tozuka, H. Sasaki, Y. Masumoto, and T. Yamagata. 2006. Intraseasonal variation of surface and subsurface currents off Java as simulated in a high-resolution ocean general circulation model. *J. Geophys. Res.* 111:1-15.
- Mélice, J.L., A. Coron, and A. Berger. 2001. Amplitude and frequency modulation of the Earth's obliquity for the last millions years. *J. Clim.*, 14:1043-1054.
- Murray, S.P. and D. Arief. 1988. Throughflow into the Indian Ocean through Lombok Strait, January 1985–January 1986. *Nature*, 333:444–447.
- Nof, D., T. Pichevib, and J. Sprintall. 2002. "Teddies" and the origin of the Leeuwin Current. *J. Phys. Oceanogr.*, 32:2571-2588.
- Pujiana, K., L. Gordon, and J. Sprintall. 2013. Intraseasonal kelvin wave in Makassar Strait. *J. Geophys. Res.*, 118:2023-2034.
- Purba, M., I.N. Natih, dan A.S. Atmadipoera. 1994. Keterkaitan sifat-sifat oseanografis dan sifat biologis sebagai akibat proses upwelling di perairan selatan Jawa. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor. 57hlm.
- Qiu, B., M. Mao, and Y. Kashino. 1999. Intraseasonal variability in the Indo-Pacific Throughflow and regions surrounding the Indonesian Seas. *Am. Meteorol. Soc.*, 29:1599-1618.
- Qu, T. and R. Lukas. 2003. On the bifurcation of the North Equatorial Current in Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 33:5-18.
- Qu, T., Y.Y. Kim, M. Yaremchuk, T. Tozuka, A. Ishida, and T. Yamagata. 2004. Can Luzon Strait transport play role in conveying the impact of ENSO to the South Cina Sea?. *J. Clim.*, 17:3644-3657.
- Sprintall, J., A.L. Gordon, R. Martugudde, and R.D. Susanto. 2000. A semi-annual Indian Ocean forced Kelvin wave observed in the Indonesian Seas in May 1997. *Geophys Res Lett.*, 105:17217-17230.
- Sprintall, J., S.E. Wijffels, R. Molcard, and I. Jaya. 2009. Direct estimation of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004-2006. *J. Geophys. Res.*, 114:1-9.
- Stewart, R.H. 2002. Introduction to Physical Oceanography. Dept. of Oceanography Texas A and M University. Calvestone (US). 344p.
- Susanto, R.D., A.L. Gordon, and J. Sprintall. 2007. Observation and proxies of the surface layer throughflow in Lombok Strait. *J. Geophys. Res.*, 112:1-11.
- Syamsudin F., A. Kaneko, and D.B. Haidvogel. 2004. Numerical and observational estimates of Indian Ocean Kelvin wave intrusion into Lombok Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 31:1-4.
- Tranchant, B., G. Reffray, E. Greiner, D. Nugroho, A. Koch-Larrouy, and P. Gaspar. 2015. Evaluation of an operational ocean modal configuration at 1/12° spatial resolution for the Indonesian seas. *Oce. Phys. Geosci. Model. Dev. Disc.*, 8:6611-6668.
- Wyrtki, K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian Water. *Naga Report.*, 2(1):1-195.
- Wyrtki K. 1973. An equatorial jet in the Indian Ocean. *Science*. 1:262-264.
- Diterima* : 19 April 2017
Direview : 10 Mei 2017
Disetujui : 30 November 2017