

VARIABILITAS INTRA-MUSIMAN ARUS DEKAT-DASAR DI LAUT HALMAHERA

INTRA-SEASONAL VARIABILITY OF NEAR-BOTTOM CURRENT IN THE HALMAHERA SEA

Marlin C. Wattimena^{1*}, Agus S. Atmadipoera², Mulia Purba², dan Ariane Koch-Larrouy³

¹Sekolah Pascasarjana, P.S. Ilmu Kelautan, IPB, Bogor; *Email: marlincw@yahoo.com

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor

³LEGOS, Observatoire Midi-Pyrene, Toulouse, France

ABSTRACT

The secondary entry portal of the Indonesian Throughflow (ITF) from the Pacific to Indian Oceans is considered to be via the Halmahera Sea (HS). However, few ITF studies have been done within the passage. This motivated the Internal Tides and Mixing in the Indonesian Throughflow (INDOMIX) program to conduct direct measurements of currents and its variability across the eastern path of the ITF. This study focused on the intra-seasonal variability of near-bottom current in HS (129°E, 0°S), its origin and correlation with surface zonal winds and sea surface height over the equatorial Pacific Ocean. The result showed a strong northwestward mean flow with velocity exceeding 40 cm/s, which represented the current-following topography with the northwest orientation. Meridional current component was much stronger than the zonal component. The energy of power spectral density (PSD) of the current peaked on 14-days and 27-days periods. The first period was presumably related to the tidal oscillation, but the latter may be associated with surface winds perturbation. Furthermore, cross-PSD revealed a significant coherency between the observed currents and the surface zonal winds in the central equatorial Pacific zonal winds (180°E-160°W), which corroborates westward propagation of intra-seasonal sea surface height signals along the 5°S with its mean phase speeds of 50 cm/s, depicting the low-latitude westward Rossby waves on intra-seasonal band.

Keywords: *current, equatorial Pacific Ocean, zonal winds, sea surface height, Halmahera Sea.*

ABSTRAK

Gerbang masuk kedua arus lintas Indonesia (ARLINDO) dari Samudra Pasifik diyakini melalui Laut Halmahera (HS). Namun, sedikit studi ARLINDO yang pernah dilakukan di daerah ini. Hal ini memotivasi studi program pasang surut internal dan pencampuran di lintasan ARLINDO (INDOMIX) melakukan pengukuran langsung arus dan variabilitasnya di jalur timur ARLINDO. Penelitian ini difokuskan untuk menyelidiki variabilitas intra-musiman arus dekat-dasar di HS (129°E, 0°S), asal-usul dan korelasi dengan angin zonal permukaan serta tinggi permukaan laut di daerah ekuator Samudera Pasifik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rerata arus ke arah barat laut tergolong kuat dengan kecepatan melebihi 40 cm/s, dimana arah arus ini mengikuti kondisi topografi dasar yang orientasi barat laut. Komponen arus meridional ternyata lebih kuat dari komponen zonal. Energi spektrum densitas energi (PSD) arus mencapai puncak pada periode 14-hari dan 27-hari. Periode pertama berkaitan dengan osilasi pasang surut, tetapi yang terakhir kelihatannya berhubungan dengan perturbasi angin permukaan. Selain itu, korelasi silang PSD mengungkapkan koherensi yang signifikan antara arus yang diamati dengan angin zonal permukaan di kawasan ekuator Samudera Pasifik tengah (180°E - 160°W). Fluktuasi angin ini berkaitan dengan propagasi sinyal tinggi muka laut intra-musiman ke arah barat sepanjang 5°S dengan rata-rata kecepatan fase dari 50 cm/s, yang menggambarkan perambatan gelombang Rossby lintang rendah ke arah barat pada periode intra-musiman.

Kata kunci: arus, angin zonal, ekuator Samudera Pasifik, Laut Halmahera.

I. PENDAHULUAN

Osilasi intra-musiman atau *intra-seasonal oscillation* (ISO) yang juga dikenal sebagai Madden-Julian *Oscillation* (MJO) dijelaskan oleh Madden and Julian (1971, 1972) dan banyak peneliti lainnya setelah itu. Osilasi intra-musiman memiliki periode osilasi dengan kisaran 20-60 hari. Osilasi dengan siklus intra-musiman dapat mendeteksi fenomena MJO yang lebih berperan dalam mempengaruhi variabilitas cuaca dalam skala lokal. Uraian tentang variabilitas intra-musiman di sekitar wilayah perairan Indonesia sangat kompleks oleh karena beberapa alasan (Qiu *et al.*, 1999). Pertama, wilayah perairan Indonesia merupakan wilayah dimana MJO memiliki sinyal angin permukaan yang terkuat. Kedua, perairan Indonesia berada di wilayah ekuator dan daerah perambatan gelombang panjang mengakibatkan sirkulasi lautan dengan angin sebagai penyebab gaya permukaan. Ketiga, adanya kompleksitas geometri garis pantai di wilayah perairan Indonesia ketika berinteraksi dengan aliran yang berubah secara musiman.

Peranan ARLINDO penting dalam perkembangan iklim dunia (Gordon *et al.*, 2010). Rute, asal massa air dan volume transpor ARLINDO menjadi bahan penelitian menarik baik bagi peneliti Indonesia maupun peneliti berbagai negara. Hasil *mooring* ekspedisi program *International Nusantara Stratification and Transport* (INSTANT) tahun 2004 - 2006 di beberapa lintasan ARLINDO menemukan adanya ketidakseimbangan antara arus masuk dan arus keluar dari ARLINDO pada skala waktu intra-musiman hingga musiman (Gordon *et al.*, 2010).

Laut Halmahera memiliki massa air yang dipengaruhi oleh dinamika barat tropis Samudera Pasifik, keberadaan sistem arus ekuatorial dan kolam air hangat sehingga memberikan pengaruh

yang besar terhadap interaksi laut-atmosfer. Wilayah perairan ini juga mempunyai dinamika arus yang kompleks yang kemungkinan disebabkan oleh bentuk geometri dan topografi yang juga kompleks. Ada beberapa arus yang berperan dalam mentranspor massa air di daerah ini antara lain Arus Mindanao (MC), *New Guinea Coastal Current* (NGCC), *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC), *North Pacific Counter Current*, Halmahera Eddy, dan Mindanao Eddy (Fine *et al.*, 1994; Cresswell 2001; Kashino *et al.*, 2007).

Mengingat posisi Laut Halmahera diperkirakan cukup strategis dan berperan penting dalam mendeteksi fenomena-fenomena yang muncul akibat adanya dinamika laut-atmosfer maka dipilihlah perairan ini sebagai lokasi penambatan *mooring Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) di kedalaman ± 750 m pada kegiatan penelitian *Internal Tides and Mixing in The Indonesian Through-flow* (INDOMIX) tahun 2010 untuk mengukur transpor ARLINDO yang melalui lintasan timur. *Mooring* diletakan pada rentang waktu Juli 2010 hingga Desember 2012 sehingga diperoleh data arus secara deret waktu dalam rentang waktu $\pm 2,5$ tahun. Hasil ekspedisi ini mengungkapkan adanya fluktuasi arus dalam skala periode intra-musiman, musiman dan antar-tahunan (Atmadipoera *et al.*, 2013).

Fokus dari penelitian ini adalah mengkaji arus dekat dasar (kedalaman 724 m) di Laut Halmahera. Tujuan penelitian ini adalah menentukan karakter arus dekat dasar, variabilitas arus dalam skala waktu intra-musiman, serta hubungan koherensi variabilitas arus dekat dasar dengan angin *zonal* di ekuator barat Pasifik yang diperkirakan sebagai faktor penyebab fluktuasi.

II. METODE PENELITIAN

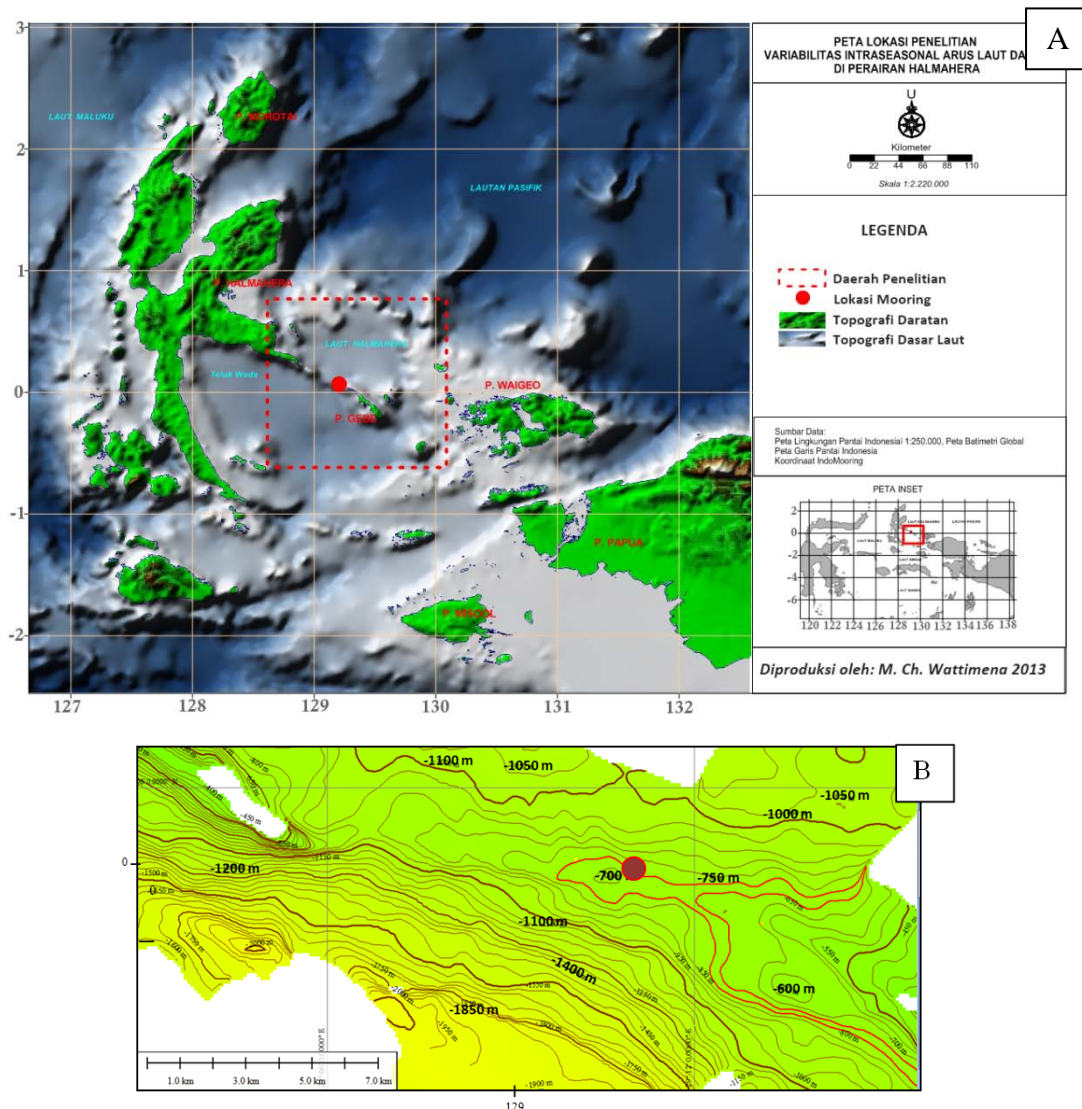
2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian yang dikaji adalah daerah perairan Laut Halmahera dengan satu titik *mooring* pada 0°04.066' N - 129°12.4' E, dengan jarak 12 km dari Pulau Gebe (bagian ujung tenggara kaki Pulau Halmahera) (Gambar 1).

2.2. Data Arus

Data arus yang digunakan diperoleh dari hasil *mooring* RD Instrument *Acoustic Doppler Current Profiler*

(ADCP) *Workhorse* 75-kHz yang merupakan bagian dari program INDOMIX dan ditempatkan di kedalaman ± 750 m, selama $\pm 2,5$ tahun dari Juli 2010 – Desember 2012. ADCP mengukur arah dan kecepatan arus dari permukaan hingga dasar setiap satu jam. Data yang dipakai pada penelitian ini adalah data pada bin 1 (dekat dasar, kedalaman 724 m). Data arus ini terdiri dari komponen u (timur-barat) dan v (utara-selatan) dengan satuan m/s. Data yang digunakan telah sesuai dengan pengolahan data dan koreksi ADCP *mooring* (Atmadipoera *et al.*, 2013).



Gambar 1. Lokasi Penelitian; A. Peta lokasi *mooring*; B. Topografi lokasi *mooring* (titik merah merupakan lokasi *mooring*).

2.3. Data Angin

Data angin yang digunakan bersumber dari *European Center for Medium Range Forecast* (ECMWF) dengan cakupan wilayah 10° LU – 10° LS dan 129°BT-160°BB. Data ini merupakan kecepatan angin rata-rata harian selama 2010-2012 dengan satuan m/s yang terdiri dari komponen angin zonal (u) dan meridional (v). Data angin ini diukur pada ketinggian referensi 10 meter di atas permukaan laut dengan resolusi spasial sebesar 1,5° x 1,5° dan digunakan untuk melihat korelasi antara arus laut dan angin serta menelaah lokasi tiupan angin yang diperkirakan sebagai faktor penggerak osilasi intra-musima dari arus.

2.4. Data Anomali Tinggi Muka Laut (Sea Surface Height Anomaly)

Data anomali tinggi muka laut (SSHA) yang digunakan bersumber dari AVISO - SSH yang merupakan gabungan produk altimetri dari beberapa satelit. Data SSHA merupakan data harian selama juli 2010-Desember 2012 dengan resolusi spasial 1/4°.

2.5. Spektrum Densitas Energi

Spektrum densitas energi digunakan untuk mengetahui periode fluktuasi yang energinya signifikan dari data arus dekat-dasar dan data angin permukaan. Dalam metode *Fast Fourier Transform* (FFT), komponen fourier ($X(f_k)$) yang diberikan oleh (Bendat dan Piersol, 1971):

$$X(f_k) = \Delta t \sum_{t=0}^{N-1} x_t \exp(-i2\pi kt/N) \quad (1)$$

dimana: $X(f_k)$ adalah komponen Fourier dari data deret waktu (x_t) pada frekuensi ke- k (f_k); N adalah jumlah data; Δt adalah selang waktu pengambilan data (1 hari); i adalah $\sqrt{-1}$ (bilangan imajiner); t adalah 0, 1, 2, ..., N .

Nilai spektrum densitas energi dari data arus dekat-dasar ditentukan dengan

menggunakan rumus (Bendat dan Piersol, 1971):

$$S_x(f_k) = \frac{2\Delta t}{N} |X(f_k)|^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

dimana: $S_x(f_k)$ adalah nilai densitas energi satu rekaman data deret waktu pada frekuensi ke- k (f_k); $X(f_k)$ adalah komponen *Fourier* dari data deret waktu (x_t) pada frekuensi ke- k (f_k); Δt adalah selang waktu pengambilan data (1 hari); N adalah jumlah data.

2.6. Korelasi Silang

Korelasi silang digunakan untuk melihat apakah ada hubungan antara fluktuasi dua parameter. Artinya apakah suatu fluktuasi dibangkitkan oleh fluktuasi lainnya. Spektrum korelasi silang terdiri dari spektrum densitas energi, koherensi dan beda fase antara variabel (x) dan (y). Angin *zonal* digunakan sebagai variabel (x) sedangkan arus zonal dan meridional sebagai variabel (y). Spektrum densitas energi ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Bendat dan Piersol, 1971):

$$S_{xy}(f_k) = \frac{2\Delta t}{N} |X(f_k) * Y(f_k)| \quad \dots\dots\dots(3)$$

dimana: $S_{xy}(f_k)$ adalah spektrum densitas energi silang; $f_k = k/Nh$, $k=0,1,2,\dots,N-1$; $X(f_k)$ adalah komponen *Fourier* dari x_t ; $Y(f_k)$ adalah komponen *Fourier* dari y_t ; Δt adalah selang waktu pengambilan data (1 hari); N adalah jumlah data.

Koherensi kuadrat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\gamma^2_{xy}(f_k) = \frac{|S_{xy}(f_k)|^2}{S_x(f_k)S_y(f_k)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

dimana: $S_x(f_k)$ adalah densitas energi dari spektrum x_t . $S_y(f_k)$ adalah densitas energi dari spektrum y_t .

Beda fase dihitung dengan persamaan yang ditulis oleh Bendat dan Piersol (1971) yaitu :

$$\theta_{xy}(f_k) = \tan^{-1} \left| \frac{Q_{xy}(f_k)}{C_{xy}(f_k)} \right| \dots\dots\dots(5)$$

dimana: $Q_{xy}(f_k)$ adalah bagian imajiner dari $S_{xy}(f_k)$; $C_{xy}(f_k)$ adalah bagian nyata dari $S_{xy}(f_k)$.

2.7. Analisis Wavelet

Analisis wavelet bertujuan melihat variabilitas total dari arus dengan waktu terjadinya fluktuasi yang mempunyai energi yang dominan. Analisis wavelet yang digunakan adalah *Continous Wavelet Transform* (CWT) dan *Wavelet Transform Coherence* (WTC). Persamaan CWT adalah sebagai berikut (Torrence dan Compo, 1998):

$$\psi_o(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \dots\dots\dots(6)$$

koherensi *wavelet* dari dua deret waktu dirumuskan sebagai berikut:

$$R_n^2(s) = \frac{|s(s^{-1}w_n^{xy}(s))|^2}{s(s^{-1}|w_n^x(s)|^2)s(s^{-1}|w_n^y(s)|^2)} \dots\dots\dots(7)$$

dimana: W_n^{xy} adalah spektrum energi silang wavelet; W_n^x adalah spektrum energi wavelet dari x_n ; W_n^y adalah spektrum energi wavelet dari y_n .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakter Arus Dekat-dasar

Pola sebaran temporal kecepatan arus rata-rata harian dekat-dasar (kedalaman 724 m) di Laut Halmahera pada selang waktu Juli 2010-Desember 2012 ditunjukkan pada Gambar 2. Statistika deskriptif arus total dan arus bulanan dari data komponen arus zonal dan komponen arus meridional selama periode *mooring* yang memperlihatkan nilai minimum, maksimum, rata-rata dan simpangan baku disajikan pada Tabel 1 dan 2. Tabel 1 memperlihatkan komponen arus zonal

mencapai kecepatan minimum dengan arah ke timur yang terjadi pada bulan Juni (Tabel 2). dan mencapai kecepatan maksimum dengan arah barat (Tabel 1) yang terjadi pada bulan November (Tabel 2). Sedangkan kecepatan komponen arus meridional mencapai minimum ke arah selatan pada bulan April dan mencapai kecepatan maksimum ke arah utara pada bulan Maret.

Pola sebaran temporal kecepatan arus rata-rata harian di daerah studi ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 A memperlihatkan hasil pengukuran kecepatan arus komponen zonal (u) dan komponen meridional (v) yang ternyata memiliki kecepatan arus yang tergolong sangat kuat di dekat dasar. Kecepatan komponen arus meridional mencapai 0,39 m/s, ke arah utara sedangkan komponen arus zonal mencapai 0,31 m/s ke arah barat (Tabel 1 dan 2). Hal ini mengindikasikan bahwa kecepatan arus dekat-dasar (kedalaman 724 m) lebih cenderung bergerak ke arah utara-selatan dibandingkan ke arah timur-barat.

Gambar 2 B memperlihatkan pola sebaran arah dan kecepatan arus dekat dasar yang ditampilkan berupa *stickplot*. Arus dekat dasar dominan bergerak menuju ke arah barat laut. Hal ini disebabkan oleh posisi *mooring* yang ditambatkan berdekatan dengan lereng di perairan Halmahera yang cenderung membentuk lereng ke arah barat laut, sehingga arah arus cenderung menyusuri lereng tersebut (Gambar 1 B).

Ada beberapa arus yang berperan dalam dalam mentranspor massa air ke lokasi studi antara lain Arus Mindanao (MC), *New Guinea Coastal Current* (NGCC), *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC), *North Pacific Counter Current*, Halmahera Eddy, dan Mindanao Eddy (Fine *et al.*, 1994; Cresswell, 2001; Kashino *et al.*, 2007). Beragam arus ini berperan sesuai dengan fungsinya

Tabel 1. Statistik komponen arus zonal dan meridional selama periode mooring (Juli 2010 – Des 2012).

	Komponen u (m/s)	Arah	Komponen v (m/s)	Arah
Min	0,01	Timur	0,01	Selatan
Max	0,31	Barat	0,39	Utara
Mean	0,17	Barat	0,18	Utara
Standard Deviasi	0,04	-	0,06	-

Tabel 2. Statistik arus rerata bulanan dari arus zonal dan arus meridional selama pengamatan.

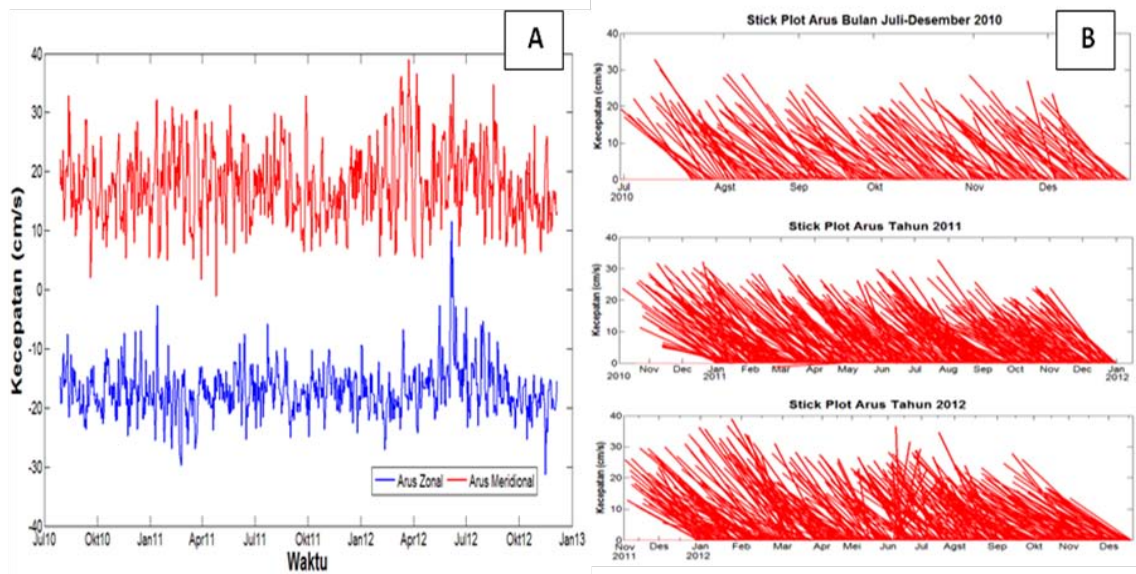
Bulan	Min		Max		Mean		Standar Deviasi	
	U (m/s)	V (m/s)	U (m/s)	V (m/s)	U (m/s)	V (m/s)	U (m/s)	V (m/s)
Jan	0,03	0,05	0,26	0,32	0,17	0,18	0,04	0,06
Feb	0,14	0,06	0,30	0,31	0,20	0,20	0,04	0,04
Mar	0,07	0,02	0,27	0,39	0,18	0,20	0,04	0,09
Apr	0,12	0,01	0,24	0,37	0,17	0,18	0,03	0,07
Mei	0,03	0,06	0,22	0,31	0,16	0,20	0,04	0,06
Juni	0,01	0,07	0,25	0,37	0,14	0,19	0,05	0,06
Juli	0,05	0,11	0,23	0,28	0,16	0,19	0,04	0,04
Agst	0,07	0,09	0,25	0,33	0,16	0,19	0,03	0,06
Sept	0,13	0,02	0,24	0,33	0,19	0,16	0,02	0,06
Okt	0,10	0,07	0,25	0,26	0,17	0,15	0,03	0,05
Nov	0,10	0,06	0,31	0,26	0,18	0,15	0,04	0,04
Des	0,07	0,06	0,24	0,28	0,17	0,17	0,03	0,04

dari permukaan hingga dekat dasar perairan. Pola sebaran arus yang dominan mengarah ke arah barat laut diduga masih dipengaruhi oleh arus *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC) dan arus *South Equatorial Current* (SEC) yang mengalir ke arah barat laut dan membawa massa air dari Pasifik selatan atau massa air *South Pacific Intermediate Water* (SPIW) yang bergerak ke arah Laut Halmahera lewat utara Pulau Papua dan terletak di lapisan dalam (Tomczak & Godfrey, 1994 dan Ffield, 1992). Cresswell *et al.* (2001), melakukan pengukuran arus pada kedalaman 400 m, 700 m dan 900m di Laut Halmahera dan mengungkapkan bahwa arah arus pada ke-

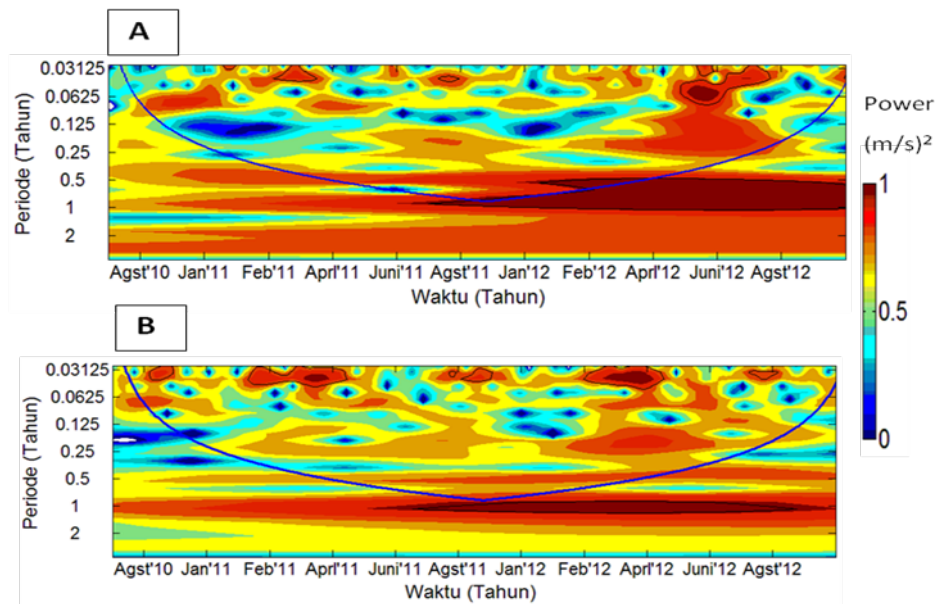
dalaman 700 m bergerak ke arah selatan, masuk lewat Laut Halmahera ke wilayah perairan Indonesia dengan kecepatan 9 cm/s. Aliran arus ini juga dipengaruhi oleh arus *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC).

3.2. Variabilitas Arus Dekat Dasar di Laut Halmahera

Hasil analisis Transformasi Wavelet Kontinyu (CWT) dari data harian arus komponen zonal dan arus komponen meridional dekat dasar di Laut Halmahera yang disajikan pada Gambar 3 menunjukkan adanya fluktuasi pada periode dua mingguan (*biweekly*) dan intra-musiman



Gambar 2 Data deret waktu komponen arus zonal dan meridional di kedalaman sekitar 724 m di lokasi *mooring* Laut Halmahera; A. Grafik sebaran temporal kecepatan komponen arus (warna merah menunjukkan komponen arus meridional, dan warna biru menunjukkan komponen arus zonal); B. Plot vektor arus yang ditampilkan setiap satu tahun, atas (2010), tengah (2011) dan bawah (2012).



Gambar 3. Transformasi wavelet kontinu (CWT); (A) Arus komponen zonal; (B) Arus komponen meridional.

(20-60 hari). Fluktuasi pada periode intramusiman terlihat sangat kuat yang ditunjukkan dengan koefisien wavelet yang

tinggi (warna merah menunjukkan koefisien wavelet yg tinggi) dan bervariasi terhadap waktu.

Komponen arus zonal terlihat memiliki periode 14-18 hari yang terlihat pada Februari 2011 dan berulang pada Juli 2011 dan Juli 2012. Periode intra-musiman (23-45 hari) yang terjadi pada September 2010 sampai November 2010, berulang pada Maret 2011 sampai April 2011 dan kembali berulang dari Maret 2012 sampai Mei 2012 dengan koefisien kemiripan wavelet yang tinggi. Komponen arus meridional memperlihatkan hal yang berbeda dengan komponen arus zonal. Periode dominan yang ditemukan pada power spektrum wavelet untuk komponen arus meridional adalah periode 14 - 18 hari dan periode intra-musiman. Periode intra-musiman (23 - 45 hari) yang terjadi pada Juli 2010 sampai September 2010, berulang pada Maret 2011 sampai April 2011 hingga berlanjut pada Mei 2011 sampai Juni 2011 dan yang paling tinggi powernya berulang dari Februari 2012 sampai Maret 2012 dan berlanjut lagi pada Mei 2012 sampai Juni 2012.

3.3. Spektrum Densitas Energi Arus Periode Intra-musiman Dekat Dasar di Laut Halmahera

Analisis lebih lanjut terfokus pada fluktuasi dalam periode intra-musiman (20-60 hari) dengan memfilter data harian dalam rentang periode intra-musiman (20-60 hari). Grafik fluktuasi sebaran temporal kecepatan arus periode intra-musiman pada selang waktu Juli 2010 - Desember 2012 dari komponen arus zonal dan komponen arus meridional ditunjukkan pada Gambar 4 A. Fluktuasi kecepatan arus pada arah meridional lebih besar daripada arah zonal. Hal ini berarti arus lebih berorientasi pada arah utara-selatan.

Plot vektor arus periode intra-musiman juga ditampilkan berupa *stickplot* (Gambar 4 B). *Stickplot* tersebut memperlihatkan pergerakan arus yang berubah arah dalam periode 14 - 30 hari. Pergerakan arus mengalir bolak balik ke arah utara-selatan, barat laut-tenggara, dan

ke arah timur laut-barat daya dengan kecepatan yang berfluktuasi. Perubahan arah arus yang demikian merepresentasikan energi fluktuasi vektor kecepatan arus dalam rentang periode intra-musiman. Pergerakan arus ke arah utara di dekat-dasar Laut Halmahera mengindikasikan bahwa massa air bergerak menuju Samudera Pasifik, sedangkan pergerakan arus ke arah selatan menyatakan bahwa arus masuk dari Samudera Pasifik lewat Laut Halmahera ke wilayah perairan Indonesia (Cresswell *et al.*, 2001). Pola sebaran arus yang dominan mengarah ke arah barat laut diduga masih dipengaruhi oleh arus *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC) dan arus *South Equatorial Current* (SEC) yang mengalir ke arah barat laut dan membawa massa air dari Pasifik selatan atau massa air *South Pacific Intermediate Water* (SPIW) yang bergerak ke arah Laut Halmahera lewat utara Papua dan terletak di lapisan dalam (Tomczak & Godfrey, 1994). Pergerakan arus yang bolak-balik setelah difilter dalam rentang intra-musiman ditemukan juga oleh Watanabe *et al.* (1997) dan Kashino *et al.* (1999), dari data deret waktu hasil *mooring* yang ditempatkan di pintu masuk Laut Sulawesi (4.08N, 127.58E) di kedalaman 350 m dan 550 m.

Spektrum densitas energi dari arus komponen zonal dan komponen meridional periode intra-musiman (20-60 hari) dekat dasar di Laut Halmahera pada selang waktu Juli 2010-Desember 2012 disajikan pada Gambar 5. Periode fluktuasi serta densitas energi yang signifikan dari arus komponen zonal dan meridional diberikan pada Tabel 3.

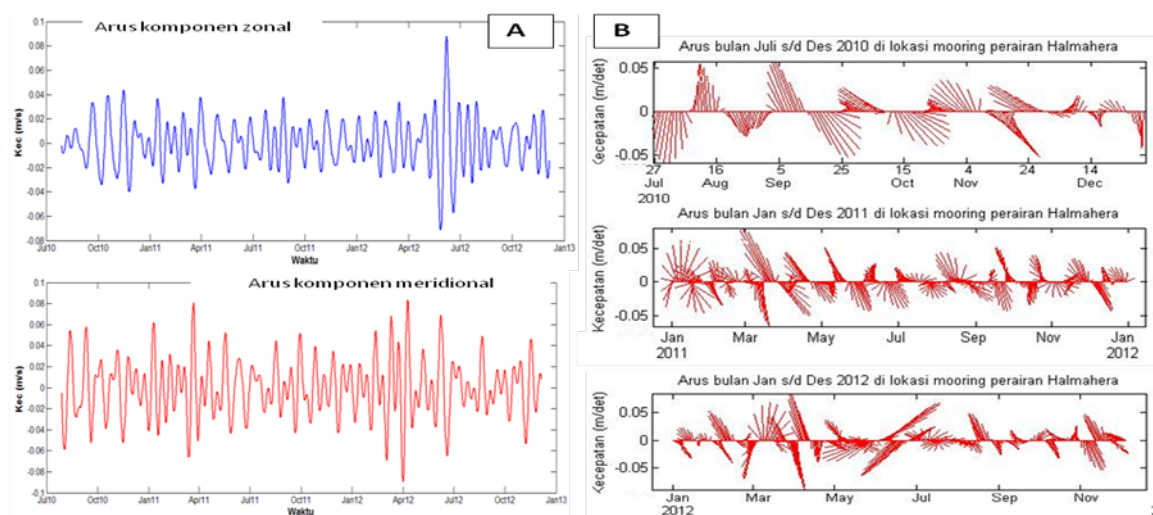
Tabel 3 dan Gambar 5 memperlihatkan 2 puncak spektrum densitas energi yang signifikan dari komponen arus zonal dan komponen arus meridional yaitu pada periode 14 hari dan 27 hari. Komponen arus meridional memiliki nilai densitas energi yang lebih besar dibandingkan komponen arus zonal. Kondisi ini

mengindikasikan bahwa arus komponen meridional lebih berpengaruh terhadap dinamika pergerakan arus dekat dasar dibandingkan arus komponen zonal.

Hasil spektrum densitas energi menunjukkan bahwa fluktuasi 27 harian sangat mempengaruhi dinamika arus dekat dasar di Laut Halmahera karena memiliki densitas energi yang signifikan yaitu $51.2 \text{ (m/s)}^2/\text{siklus per hari}$ (Tabel 3). Periode fluktuasi 27 hari ditemukan pada komponen arus zonal dan komponen arus meridional.

Fluktuasi 27 hari merupakan periode dalam skala fluktuasi intra-musiman (20-60 hari) dan tergolong sinyal *Madden Julian Oscillation* (MJO). Laut Halmahera termasuk di dalam

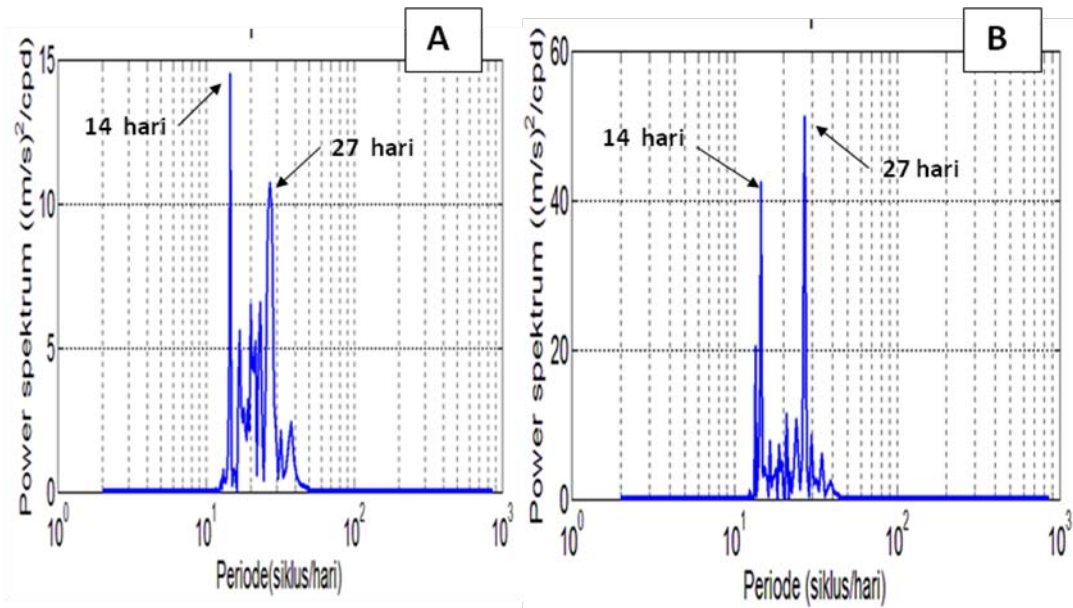
wilayah perairan Indonesia, dimana MJO memiliki sinyal angin permukaan terkuat (Madden and Julian, 1994). Fluktuasi arus periode 27 hari juga diduga digerakkan oleh angin zonal ekuator dari jauh (*remote forcing*) melalui perambatan gelombang Rossby dari Samudera Pasifik. Qiu *et al.* (1999), menyatakan bahwa dinamika internal laut dalam dapat menghasilkan variabilitas intra-musiman yang signifikan di lintang rendah barat Samudera Pasifik yang juga mencakup wilayah Laut Halmahera. Selain fluktuasi energi spektral pada periode 27 hari, ditemukan juga fluktuasi spektral dengan periode 14 hari yang diduga merupakan periode pasang surut dan juga tergolong



Gambar 4. Data deret waktu arah dan kecepatan arus untuk fluktuasi periode intra-musiman di kedalaman sekitar 724 m; A. Grafik sebaran temporal kecepatan komponen arus zonal (biru) dan komponen arus meridional (merah); B. Plot vektor arus yang ditampilkan setiap satu tahun.

Tabel 3. Periode dan Spektrum Energi Signifikan Arus Komponen Zonal dan Meridional dekat dasar (724 m) di Laut Halmahera

Kedalaman (m)	Komponen Arus	Periode (Hari)	Spektrum densitas energi signifikan $(\text{m/s})^2/\text{siklus per hari}$
724 m	u	14	14.4
		27	10.7
	v	14	42.2
		27	51.2



Gambar 5. Spektrum densitas energi arus dekat dasar (724 m) periode intra-musiman; A. komponen arus zonal; B. komponen arus meridional.

variabilitas dua mingguan (*biweekly variability*) yang terdeteksi di daerah ekuator. Fluktuasi 14 hari dan 27 hari juga diduga dipengaruhi oleh *New Guinea Coastal Undercurrent* (NGCUC) dan arus pada ekuator yang membawa massa air *Antarctic Intermediate Water* (AAIW) (Guiavarc'h *et al.*, 2008). Fluktuasi arus dalam rentang skala periode intra-musiman, musiman dan antar-tahunan ditemukan dari hasil *mooring* program INDOMIX di Laut Halmahera dalam rentang waktu Juli 2010 – Desember 2012. Fluktuasi skala intra-musiman terdeteksi di dekat dasar oleh karena energi fluktuasi dari struktur arus dekat dasar terlihat sangat kuat (Atmadipoera *et al.*, 2013).

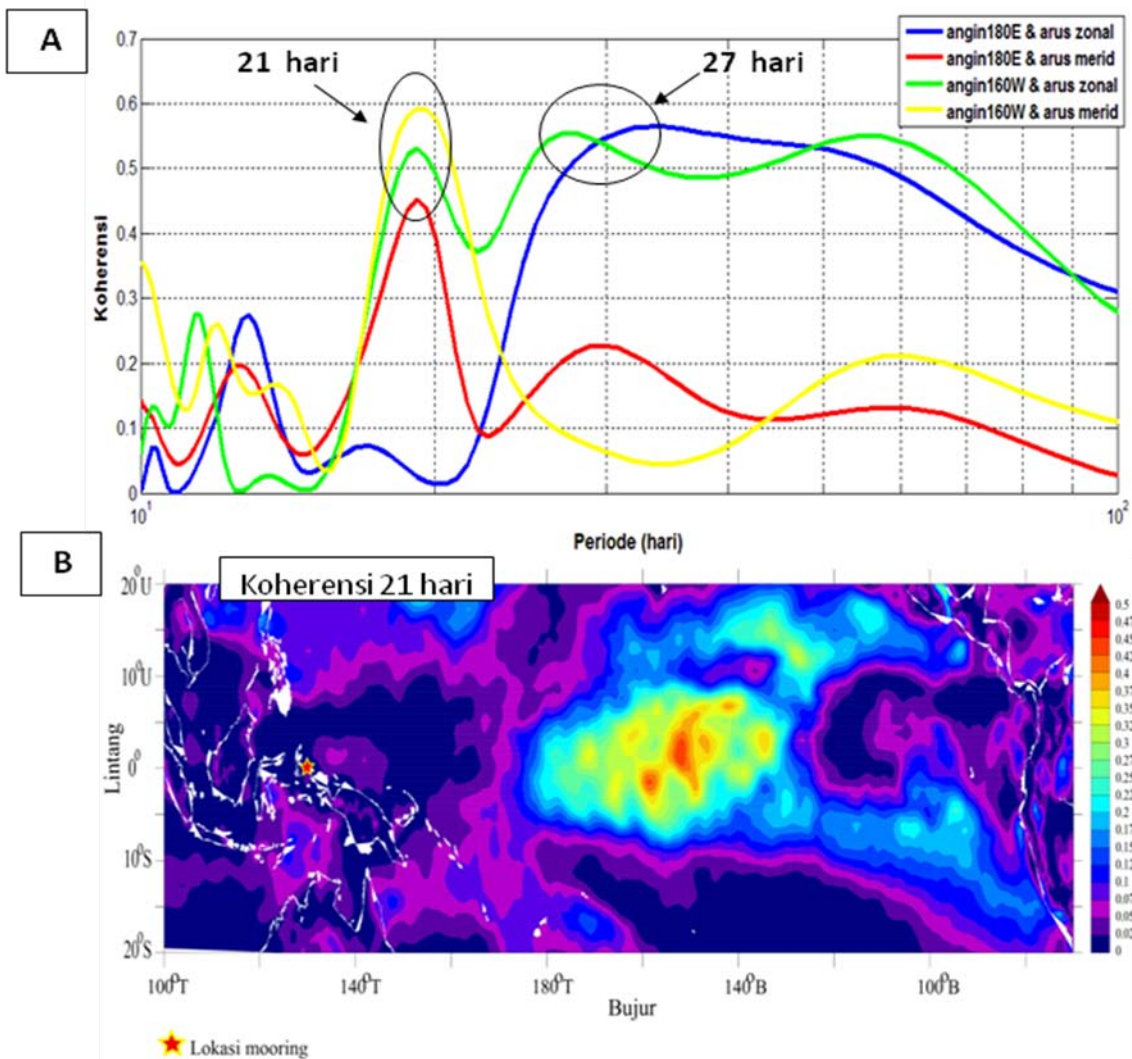
3.4. Korelasi Silang Arus Dekat Dasar dan Angin Zonal di Ekuator Barat Pasifik

Korelasi silang antara angin zonal di sepanjang ekuator Samudera Pasifik dengan arus zonal dan arus meridional di Laut Halmahera diperoleh dengan menggunakan metode FFT menghasilkan

kospektrum densitas energi (KDE) (Gambar 6A), koherensi dan beda fase (Tabel 4). *Cross power spectral density* yang menggambarkan koherensi dengan angin zonal secara global di sepanjang ekuator barat Samudera Pasifik diberikan pada Gambar 6B.

Angin zonal sepanjang ekuator Samudera Pasifik yang dikorelasikan dengan arus pengukuran *mooring* yaitu angin zonal pada 180° BT dan angin zonal pada 160° BB. Hal ini dikarenakan angin zonal permukaan yang bertiup di kedua lokasi tersebut memiliki nilai koherensi yang sedang dengan arus di lokasi *mooring* dibandingkan dengan angin zonal permukaan pada lokasi lainnya di sepanjang ekuator Samudera Pasifik.

Pola koherensi yang terbentuk dari korelasi angin zonal di sepanjang ekuator Samudera Pasifik dengan arus zonal dan arus meridional di Laut Halmahera dengan menggunakan metode FFT (Gambar 6 A) menunjukkan koherensi yang moderat dalam rentang fluktuasi intra-musiman (20-60 hari) dengan tingkat



Gambar 6. Koherensi angin zonal ekuator dan arus *mooring*; A. Menggunakan metode FFT; B. Koherensi dengan angin zonal secara global di sepanjang ekuator barat Samudera Pasifik

Tabel 4. Korelasi silang antara angin zonal dan arus *mooring* dengan metode FFT

Korelasi	Periode (Hari)	KDE ((m/s) ² /hari)	Koherensi	Beda Fase (hari)
Angin zonal 180° BT dan arus zonal	27	0,3	0,57	6
Angin zonal 180° BT dan arus meridional	21	0,16	0,45	3
Angin zonal 160° BB dan arus zonal	21	0,2	0,56	3
	27	0,4	0,52	5
Angin zonal 160°BB dan arus meridional	21	0,2	0,6	4

signifikan 95%. Koherensi angin zonal pada lokasi 180° BT dengan arus zonal memiliki koherensi yang moderat tinggi (0,58) pada periode 27 hari, koherensi angin zonal pada 180° BT dengan arus meridional memiliki nilai koherensi yang sedang (0,45) pada periode 21 hari. Nilai koherensi angin zonal pada 180° BT dengan arus zonal memiliki koherensi yang moderat tinggi (0,57) pada periode 27 hari, koherensi angin zonal pada 180° BT dengan arus meridional memiliki nilai koherensi yang moderat tinggi (0,6) pada periode 21 hari. Korelasi silang antara angin zonal pada 180° BT dan angin zonal pada 160° BB dengan arus meridional lebih kuat dibandingkan dengan nilai koherensi antara angin zonal pada 180° BT dan angin zonal pada 160° BB dengan arus zonal. Beda fase bernilai positif yang menandakan fluktuasi komponen angin zonal lebih dulu terbentuk kemudian diikuti dengan arus meridional yang mengindikasikan arus yang terbentuk merupakan respon terhadap tiupan angin.

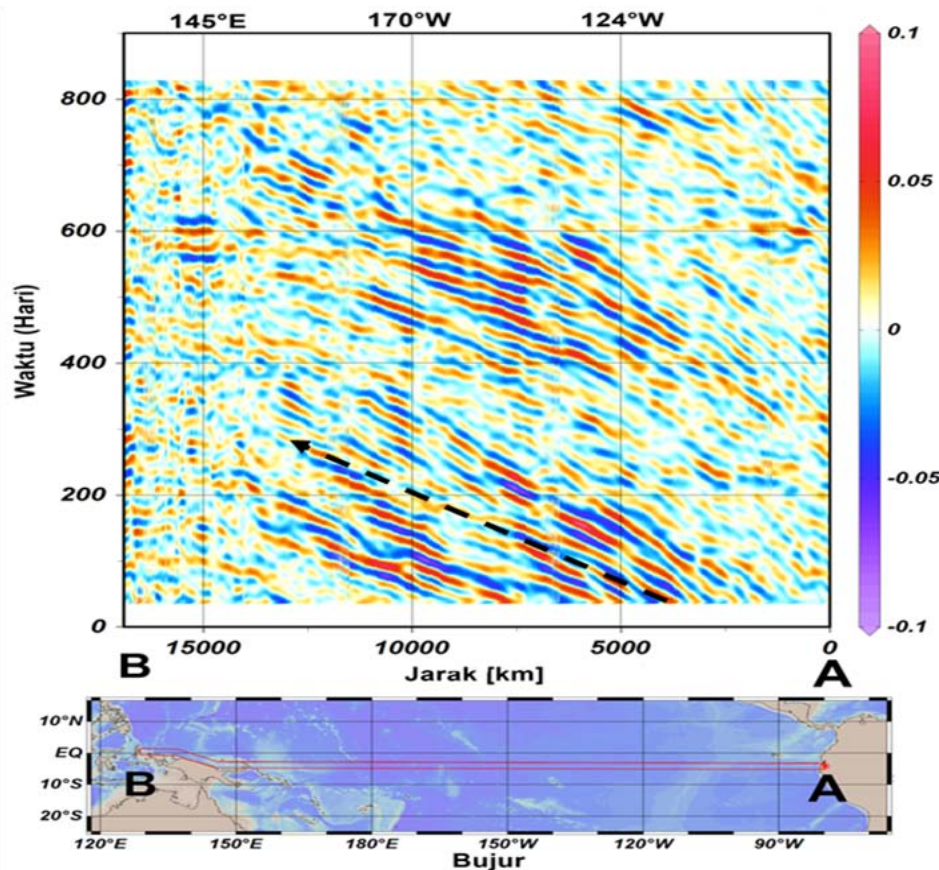
Koherensi yang sedang sampai moderat tinggi antara arus meridional dan angin zonal di kawasan ekuator barat Samudera Pasifik dari hasil *cross power spectral density* (Gambar 6 B), menunjukkan koherensi yang kuat terbentuk di sekitar 180° BT – 160° BB dengan energi yang signifikan pada periode 21 hari dan 27 hari. Hal ini mengindikasikan adanya keterkaitan antara fluktuasi arus di dekat dasar Laut Halmahera dengan fluktuasi angin zonal di ekuator Samudera Pasifik. Fluktuasi ini diduga tiba di lokasi studi melalui perambatan gelombang Rossby ekuator menuju barat Samudera Pasifik dan mencapai Laut Halmahera. Schiller *et al.* (2010) menyatakan bahwa angin zonal sepanjang ekuator Samudera Pasifik dapat berperan sebagai pembangkit gaya permukaan secara jarak jauh (*remote forcing*) sehingga menghasilkan respon gelombang Rossby yang merambat

sepanjang ekuator Pasifik yakni dari timur menuju ke barat.

Data anomali tinggi muka laut (SSHA) dengan skala intra-musiman di kawasan barat Samudera Pasifik selama periode pengukuran arus yang ditunjukkan dengan diagram Hovmöller (Gambar 7) memperlihatkan adanya propagasi SSHA ke arah barat, yang merepresentasikan penjarangan gelombang Rossby yang terbentuk di sekitar 180° BT - 160° BB dan bersesuaian dengan lokasi terbentuknya koherensi yang kuat antara arus meridional dan angin zonal (Gambar 6 B). Kecepatan fase propagasi ke arah barat yang mengindikasikan perambatan gelombang Rossby adalah $0.5 \pm 0.09 \text{ m s}^{-1}$. Estimasi kecepatan fase propagasi gelombang Rossby hasil perhitungan peneliti sebelumnya berkisar antara 50 - 60 cm s^{-1} (Meyers, 1979; Mitchum and Lukas, 1990; Kessler, 1990; Susanto *et al.*, 1998; Chelton *et al.*, 2003). Dinamika perturbasi gelombang Rossby mengalami penguatan yang bervariasi secara musiman. Amplitudo perturbasi yang besar terjadi selama Musim Barat, dengan waktu perambatan ± 4 bulan dari lokasi pembangkit gelombang Rossby ke lokasi *mooring*.

Dari uraian di atas dapat dinyatakan bahwa fluktuasi arus dalam skala intra-musiman di dekat dasar di pintu masuk Laut Halmahera berhubungan erat dengan perturbasi angin permukaan di bagian tengah ekuator Pasifik, dimana perturbasi angin permukaan ini berimplikasi terhadap pembentukan gelombang Rossby di lintang rendah yang menjalar ke arah barat. Dengan demikian, fluktuasi arus di lokasi studi diperkirakan digerakkan melalui gaya jarak jauh (*remote forcing*) dari ekuator Pasifik.

Dari uraian di atas dapat dinyatakan bahwa fluktuasi arus dalam skala intra-musiman di dekat dasar di pintu masuk Laut Halmahera berhubungan



Gambar 7. Diagram Hovmöller dari bandpass filter SSHA di Samudera Pasifik sepanjang $6.5^{\circ}\text{S} - 3^{\circ}\text{S}$.

erat dengan perturbasi angin permukaan di bagian tengah ekuator Pasifik, dimana perturbasi angin permukaan ini berimplikasi terhadap pembentukan gelombang Rossby di lintang rendah yang menjalar ke arah barat. Dengan demikian, fluktuasi arus di lokasi studi diperkirakan digerakkan melalui gaya jarak jauh (*remote forcing*) dari ekuator Pasifik.

Studi ini difokuskan pada variabilitas arus di dekat dasar, sehingga mekanisme perambatan secara vertikal dari signal gelombang Rossby di luar dari bahasan paper ini. Studi lebih lanjut diharapkan dapat menelaah variabilitas arus hasil *mooring* untuk seluruh level kedalaman yang dipadukan dengan keluaran model sirkulasi numerik untuk mengkaji perambatan gelombang Rossby secara vertikal.

IV. KESIMPULAN

Kecepatan komponen arus zonal dan komponen arus meridional sangat kuat di dekat dasar dengan kecepatan komponen arus meridional mencapai 40 cm/s. Variabilitas intra-musiman memiliki energi yang signifikan pada periode 21 hari dan 27 hari. Fluktuasi arus pada periode intra-musiman mempunyai koherensi yang signifikan dengan angin permukaan, serta anomali tinggi muka laut di wilayah ekuator Pasifik (180° BT dan 160° BB), sehingga diduga fluktuasi arus pada periode intra-musiman ini digerakkan oleh angin zonal ekuator secara jarak jauh (*remote forcing*) yang diduga melalui perambatan gelombang Rossby.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmadipoera, A., A. Koch-Larrouy, Y. Cuypers, R. Molcard, I. Jaya, and G. Harsono. 2013. New current measurement in the Halmahera passage, Indonesia. Poster Sessions, Asian Oceania Geosciences Society Symposium. Australia, 24-27 Juni 2013.
- Bendat, J.S. and A.G. Piersol. 1971. Random data analysis and measurement procedure. John Wiley and Sons Inc. New York. 366p.
- Chelton, D.B., M.G. Schlax, J.M. Lyman, and G.C. Johnson. 2003. Equatorially trapped Rossby waves in the presence of meridionally sheared baroclinic flow in the Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 56:323-380.
- Cresswell, G.R. and J.L. Luick. 2001. Current measurement in the Halmahera Sea. *J. Geophysic Res.* 106(C7):13.953-13.958
- Ffield, A. and A.L. Gordon. 1992. Vertical mixing in the Indonesian thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, 22:184-195.
- Ffield, A. and A.L. Gordon. 1996. Tidal mixing signatures in the Indonesian seas. *J. Phys. Oceanogr.*, 26:1924-1937.
- Fine, R.A., R. Lukas, F. Bingham, M. Warnar and R. Gammon. 1994. The western equatorial Pacific: a water mass crossroads. *J. Geophys. Res.*, 99:25063-25080.
- Gordon, A.L. and R.D. Susanto. 2001. Banda Sea surface layer divergence. *Ocean Dynamics*, 52:2-10.
- Gordon, A.L., J. Sprintall, H.M. Van Aken, D. Susanto, S. Wijffels, R. Molcard, A. Ffield, W. Pranowo, and S. Wirasantosa. 2010. The Indonesian throughflow during 2004-2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2): 115-128.
- Guiavarc'h, C., M. Treguier, and A. Vangriesheim. 2008. Remotely forced biweekly deep oscillations on the continental slope of the Gulf of Guinea. *J. Geophys. Res.*, 113, C06002, doi:10.1029/2007JC004471.
- Kashino, Y., I. Ueki, Y. Kuroda, and A. Purwandani. 2007. Ocean variability north of New Guinea derived from TRITON buoy data. *J. Oceanogr.*, 63:545-559.
- Kessler, W.S. 1990. Observations of long Rossby waves in the northern tropical Pacific. *J. Geophysic. Res.*, 95:5183-5217.
- Madden, R. and P. Julian. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 28:702-708
- Madden, R. and P. Julian. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 29: 1109-1123.
- Madden, R.A. and P.R. Julian. 1994. Observations of the 40-50 day tropical oscillation-A review. *Mon. Wea. Rev.*, 122:814-837.
- Meyers, G. 1979. On the annual Rossby wave in the tropical North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 9:663-674.
- Mitchum, G.T. and R. Lukas. 1990. Westward propagation of annual sea level and wind signals in the Western Pacific Ocean. *J. Climate*, 3:1102-1110.
- Qiu, B., M. Mao, and Y. Kashino. 1999. Intraseasonal variability in the Indo-Pacific throughflow and the regions surrounding the Indonesian seas. *J. Phys. Oceanogr.*, 29:1599-1618.

- Schiller, A., S.E. Wijffels, J. Sprintall, R. Molcard, and P.R. Oke. 2010. Pathways of intraseasonal variability in the Indonesian throughflow region. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50:174-200.
- Susanto, R.D., Q. Zheng, and X.H. Yan. 1998. Complex singular value decomposition analysis of equatorial waves in the Pacific observed by TOPEX/POSEIDON altimeter. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15:764-774.
- Susanto, R.D., A.L. Gordon, J. Sprintall, and B. Herunadi. 2000. Intraseasonal variability and tides in Makassar Strait. *J. Geophysic. Res*, 27(10):1499-1502.
- Tomczak, M. and J.S. Godfrey. 1994. Regional oceanography: an introduction. Pergamon Press, Oxford. 422p.
- Torrence, C. and G.P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. User guide. Colorado University. 1-18pp.
- Watanabe, H., Y. Kashino, H. Yamaguchi, M. Aoyama, B. Herunadi, K. Ando, K. Muneyama, H. Mitsudera, and Syaefudin. 1997. Moored measurement of the Indonesian throughflow at the Southwestern edge of Philippine Sea. *WOCE Newsl.*, 27:26-30.
- Diterima* : 7 Mei 2014
Direview : 10 Juni 2014
Disetujui : 15 September 2014

