

Model Variasi Transpor Volume (ARLINDO) Hubungannya Dengan ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) Di Selat Makassar

Andi Galsan Mahie[†]

Abstrak

Variasi transpor volume Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) di Selat Makassar diteliti secara detail dengan model numerik POM (*Princeton Ocean Model*) dengan gaya pembangkit angin enam jaman dari *National Center Environmental Prediction* (NCEP) tahun 1997–1998. Transpor volume dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia maksimum pada saat musim menuju musim timur dan minimum pada saat musim menuju musim barat. Di Selat Makassar pengaruh angin juga diperlihatkan, dimana pada musim timur angin maksimum dan pada musim barat minimum. Pada kejadian *El Niño* transpor volume di Selat Makassar melemah dan *La Niña* menguat.

Keywords: *Transpor volume, musim timur, musim barat, ENSO, El Niño, La Niña.*

1. Pendahuluan

Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) adalah arus utama yang menghubungkan antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia dan mengalir di bagian laut dalam kawasan timur kepulauan Indonesia. Sifat-sifat fisis dan kimiawi dari kedua samudera ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik ARLINDO (Piola & Gordon, 1984; Fine, 1985; Gordon, 1986 dalam Mardiansyah, 2003).

Pada umumnya ARLINDO bergerak dari Mindanao dan Halmahera menuju ke Selat Makassar, Selat Lombok, Laut Timor dan berakhir di Samudera Hindia. Net transpor total ARLINDO ke arah barat/barat daya sepanjang waktu merupakan aliran arus dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia dengan kisaran harga volume transpor ARLINDO menurut Miyama *dkk.* dan Lukas (dalam Mardiansyah, 2003) sebesar 10-20 Sv ($1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3/\text{dtk}$). Skema jalur lintasan Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) dapat dilihat pada Gambar 1.

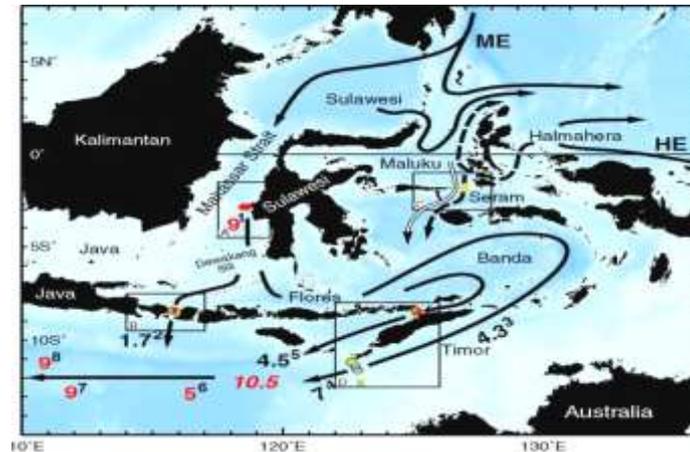
Di perairan Indonesia, Selat Makassar memegang peranan penting karena merupakan pintu gerbang utama lewatnya ARLINDO. Secara umum, Selat Makassar merupakan jalur lintasan di kawasan lintang rendah yang mentransfer panas, salinitas rendah dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia. ARLINDO berperan penting dalam rantai sirkulasi termohalin dan fenomena iklim global (Sprintal *dkk.*, 2000; Gordon, 2000).

Kondisi iklim regional/global mempengaruhi naik turunnya laju transpor ARLINDO. Pada saat *La Niña*, transpor ARLINDO menguat di hampir seluruh perairan lintasan ARLINDO, sedangkan pada saat *El Niño*, transpor ARLINDO melemah di hampir seluruh perairan lintasan ARLINDO (Godfrey, 1996; Meyers, 1996; Gordon, *dkk.*, 1998).

Pengaruh kondisi iklim regional/global adalah berupa naik atau turunnya laju transpor dibandingkan kondisi iklim normal. Pada saat *La Niña* mendominasi iklim regional/global, transpor ARLINDO menguat di hampir seluruh perairan lintasan ARLINDO. Sedangkan pada saat *El Niño* mendominasi, transpor ARLINDO melemah di hampir seluruh perairan lintasan ARLINDO. Hal ini telah diperkuat beberapa studi sebelumnya baik

[†] Staf Pengajar pada Jurusan Matematika FMIPA Universitas Hasanuddin Makassar

observasi maupun pendekatan numerik [Kindle *dkk.*, 1989; Meyers, 1996; Bray *dkk.*, 1996; Fieux *dkk.*, 1996; Gordon & Fine, 1996; Potemra *dkk.*, 1997; Gordon & McClean, 1999]. Meyers (1996) mengidentifikasi bahwa ARLINDO menunjukkan kekuatan maksimumnya pada periode La Niña 1988-1989, dan minimumnya pada periode El Niño tahun 1986-1987 serta 1991-1994.



Gambar 1. Skema Jalur Lintasan ARLINDO.

Transpor massa air di perairan yang terlintasi oleh ARLINDO cenderung untuk konstan sepanjang tahunnya, namun besarnya sangat erat terkait dengan pengaruh situasi iklim regional/global. Dalam studi ini ditinjau adalah Selat Makassar yang merupakan salah satu selat yang menjadi lintasan ARLINDO. Transpor volume Selat Makassar yang diukur dengan mooring MAK-1 dan MAK-2 (Gambar 2) sebesar 12.5Sv pada periode La Niña (Desember 1996–Februari 1997), dan 5.1Sv pada periode El Niño (Desembar 1997-Februari 1998).



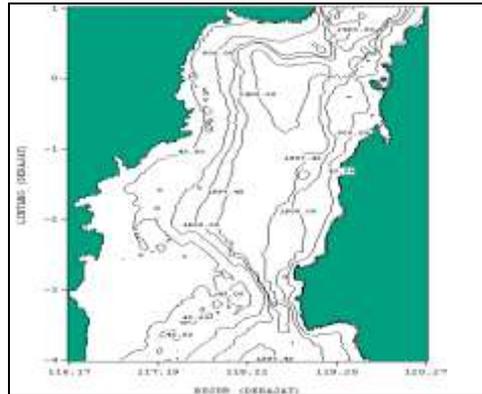
Gambar 2. Peta Selat Makassar. Posisi MAK-1 ($2^{\circ}51.69'S; 118^{\circ}27.51'E$) dan MAK-2 ($2^{\circ}51.24'S; 118^{\circ}37.69'E$).

2. Model Numerik

Model laut yang digunakan dalam studi ini adalah model laut Princeton (*Princeton Ocean Model* atau POM). Model ini pada awalnya dibangun oleh Blumberg & Mellor (pada akhir tahun 1970-an), dan sekarang telah banyak mengalami modifikasi yang diberikan oleh peneliti-peneliti lainnya.

Daerah penelitian yang dimodelkan adalah perairan Selat Makassar dan sekitarnya, yaitu pada $4^{\circ}\text{LS}-1^{\circ}\text{LU}$ dan $116,17^{\circ}\text{BT}-120,27^{\circ}\text{BT}$. Data batimetri daerah model adalah data batimetri sekunder yang diterbitkan oleh Dinas Hidro-Oseanografi TNI-AL(1992), sebagaimana yang diberikan pada Gambar 3, dengan nomor peta sebagai berikut:

1. Peta batimetri Selat Makassar No. 126
2. Peta batimetri Selat Makassar No. 127
3. Peta batimetri Selat Makassar. 128



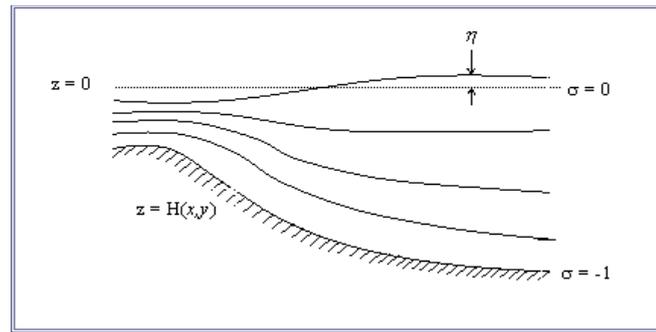
Gambar 3. Batimetri Daerah Model.

Untuk membangun model hidrodinamika arus yang dibangkitkan oleh angin, peta kedalaman perairan tersebut dideskritisasi dengan ukuran grid $\Delta x = \Delta y = 2500$ m, dengan jumlah grid pada arah x ada sebanyak 182 dan untuk arah y sebanyak 222 grid, sedangkan secara vertikal dibagi menjadi 7 lapisan. Untuk kestabilan model, maka ditambahkan grid bayangan di batas utara, dan selatan masing-masing 10 grid. Sehingga jumlah grid keseluruhan untuk arah y ada 242. Teknik ini diperkenalkan oleh Zhang & Li (1996).

Model ini disimulasikan selama dua tahun yaitu 1997 dan 1998 yang merupakan tahun kejadian El Niño dan La Niña dengan gaya pembangkit arus adalah angin. Di dalam model POM dilakukan transformasi persamaan pengatur dalam arah vertikal dari sistem koordinat kartesian ke koordinat- σ . Transformasi ini dibuat untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih baik di lapisan permukaan dan dasar. Sistem koordinat ini akan mengikuti bentuk topografi dasar perairan sebagaimana terlihat pada Gambar 4. Transformasi yang digunakan adalah

$$x^* = x; y^* = y; \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, t^* = t \quad (1)$$

dimana x, y, z adalah koordinat kartesian, $D = H + \eta$ adalah kedalaman total dengan $H(x, y)$ adalah topografi dasar, dan $\eta(x, y, t)$ adalah elevasi permukaan air. Koordinat- σ merubah interval kolom air dari permukaan ($z = \eta$) ke dasar ($z = -H$) menjadi kedalaman yang seragam dari 0 sampai -1.



Gambar 4. Sistem Koordinat Sigma- σ .

Persamaan-persamaan pembangun model sirkulasi arus 3D yang sudah ditransformasikan ke dalam sistem koordinat σ adalah

- Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

- Persamaan gerak dalam arah x dan y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (4)$$

dimana:

- U dan V : masing-masing komponen kecepatan arus untuk arah timur-barat dan utara-selatan
- ω : kecepatan vertikal dalam koordinat- σ
- t : waktu
- f : parameter Coriolis
- g : percepatan gravitasi
- η : elevasi permukaan air
- ρ_0 : densitas referensi air
- ρ' : nilai fluktuasi dari densitas air
- K_M : viskositas eddy vertikal
- F_x dan F_y : suku difusi horisontal dalam arah x dan y

Simbol ω pada persamaan di atas merupakan kecepatan vertikal dalam koordinat- σ . Secara fisis ω adalah komponen kecepatan normal ke permukaan sigma (σ). Kecepatan arus dalam arah vertikal di dalam koordinat Cartesian adalah

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (5)$$

Model POM menggunakan teknik penyelesaian mode pemisah (*mode-splitting technique*) untuk mereduksi sejumlah besar pekerjaan komputasi dalam model 3D. Langkah waktu (*time step*) perhitungan dalam teknik ini ada dua macam, yaitu langkah waktu pendek dipakai untuk menyelesaikan persamaan dua dimensi (2D) yang diintegrasikan secara vertikal (mode eksternal), dan langkah waktu yang lebih panjang dipakai untuk persamaan tiga dimensi (mode internal). Mode eksternal diselesaikan dengan menggunakan persamaan yang diintegrasikan secara vertikal (2D), yaitu

- Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial D\bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

- Persamaan gerak dalam arah x dan y :

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}}{\partial y} - f\bar{V} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 D} + A_H \Delta \bar{U} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2}{\partial y} + f\bar{U} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 D} + A_H \Delta \bar{V} \quad (8)$$

dimana

\bar{U} dan \bar{V} : komponen kecepatan arus yang dirata-ratakan terhadap kedalaman masing-masing untuk arah timur-barat dan utara-selatan

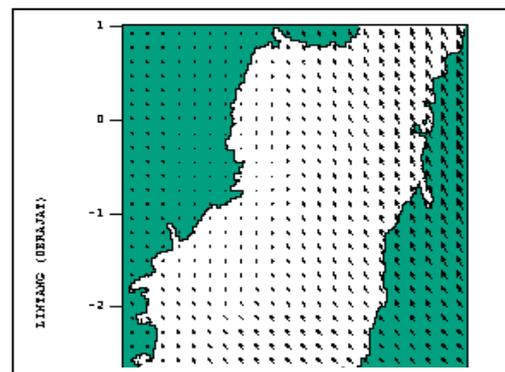
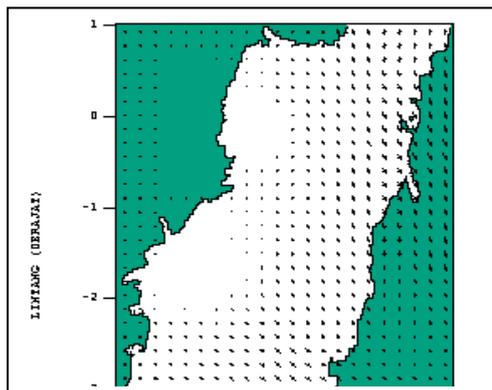
τ_{sx} dan τ_{sy} : stress permukaan masing-masing untuk arah x dan y

τ_{bx} dan τ_{by} : stress dasar masing-masing untuk arah x dan y

A_H : viskositas eddy horisontal

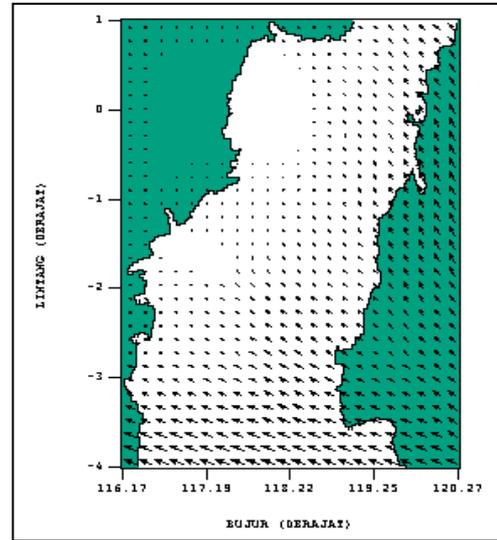
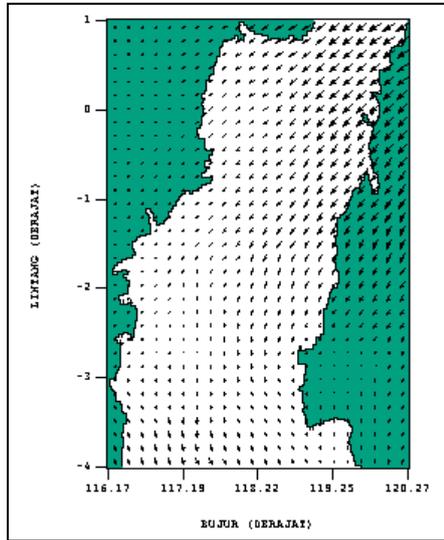
$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$: operator Laplace 2-dimensi

Syarat batas yang digunakan adalah sebagai berikut. Batas darat menggunakan syarat batas tertutup dimana kecepatan yang datang tegak lurus pantai adalah sama dengan nol (*Zero flow normal*), sedangkan pada batas terbuka menggunakan syarat batas radiasi Sommerfeld berdasarkan teknik penjalaran gelombang. Syarat batas permukaan diberikan oleh kecepatan angin pada ketinggian 10m di atas permukaan laut dengan data angin seperempat harian (6 jam-an) dari NCEP, lihat Gambar 5.



(a). Februari 1997 (Musim Barat)

(b). Agustus 1997 (Musim Timur)



(c). Februari 1998 (Musim Barat)

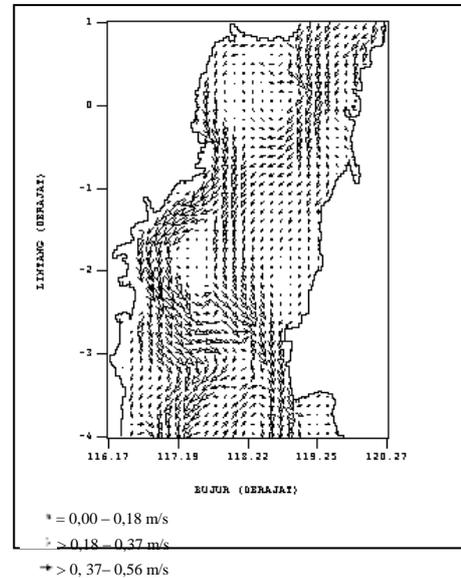
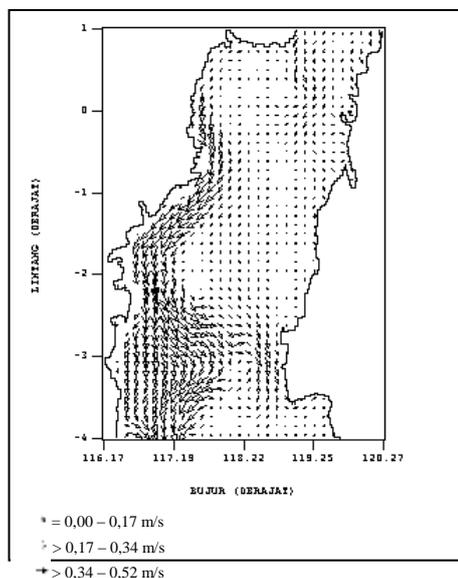
(d). Agustus 1998 (Musim Barat)

Gambar 5. Pola Kecepatan Angin Rata-Rata Bulanan Di Musim Barat dan Musim Timur pada Tahun 1997 & 1998 dari Satelit NCEP.

Gambar 6 menunjukkan pola arus permukaan pada bulan Februari dan Agustus. Secara rata-rata pola arus permukaan di musim-musim barat dan timur bergerak lebih dominan ke arah selatan (laut Jawa). Untuk musim timur sangat jelas dipengaruhi oleh pergerakan arah angin barat yang bertiup dari daratan Asia ke Australia (utara-selatan). Sedangkan pada musim barat pola arus rata-rata permukaan ke utara diakibatkan oleh adanya akumulasi program yang dijalankan mulai tahun 1997.

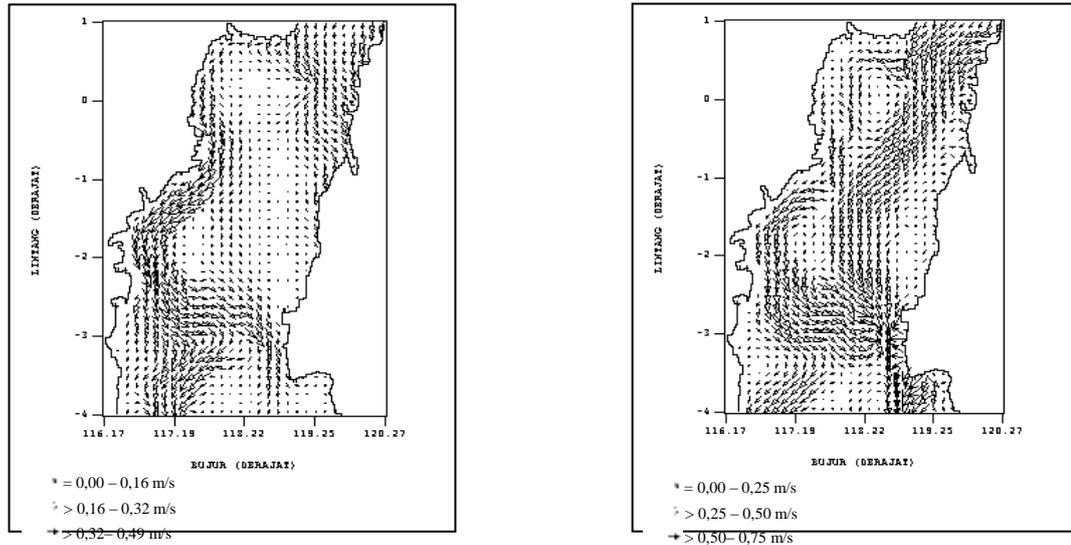
a. Februari 1997 (musim barat)

b. Agustus 1997 (musim timur)



c. Februari 1998 (musim barat)

d. Agustus 1998 (musim timur)

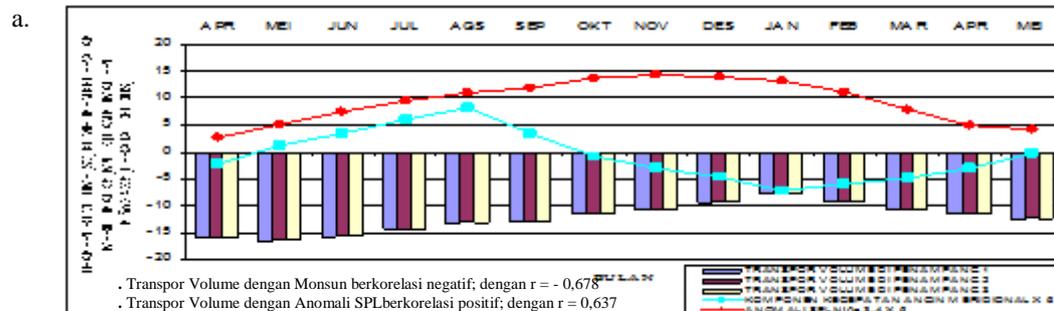


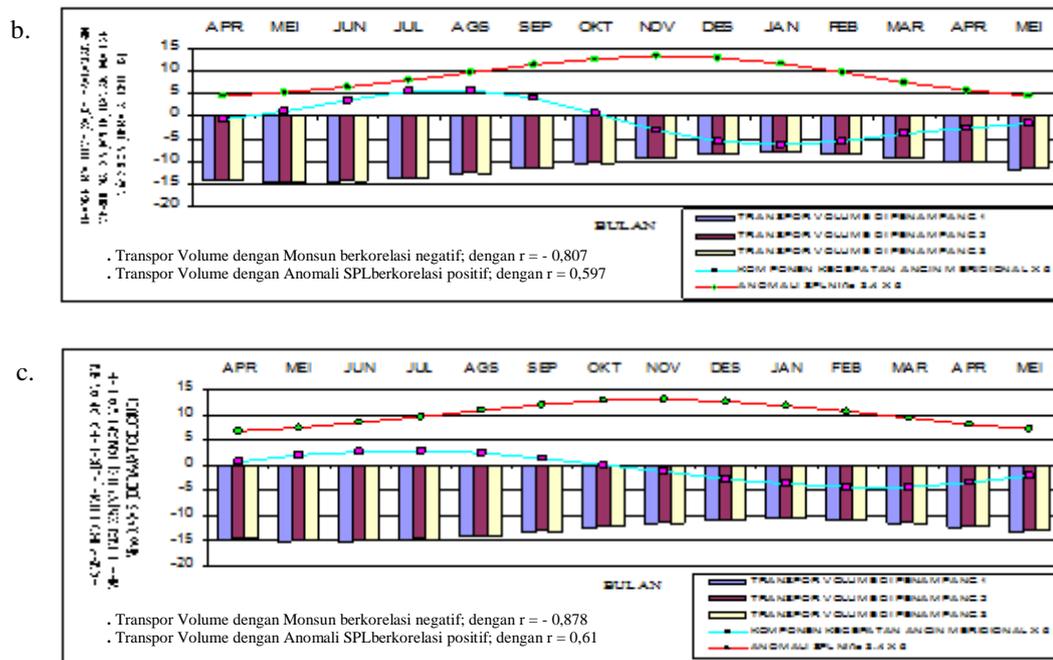
Gambar 6. Pola Kecepatan Arus Rata-Rata (m/s) pada Kedalaman 10m di Bulan (a) Februari (musim barat), (b) Agustus (musim timur)

3. Variabilitas Transpor Musiman Di Selat Makassar

Pada Gambar 7 menggambarkan transpor volume, komponen angin utara-selatan (meredional) dan anomali SST 1997–1998. Transpor volume di Selat Makassar menggambarkan pada musim timur (maksimum) dan musim barat (minimum). Namun pada tahun kejadian El Niño (1997) transpor yang melewati Selat Makassar mengecil pada bulan September–Desember yang diikuti dengan membesarnya Anomali Suhu Permukaan Laut (SST, *Sea Surface Temperatur*) di Nino 3,4 (daerah Pasifik Tengah dan menurunnya elevasi muka laut di Pasifik Barat. Hal ini berarti bahwa air hangat di Pasifik Barat bergerak ke timur yang mengakibatkan turunnya elevasi muka laut dan transpor ARLINDO dan transpor lintasan ARLINDO termasuk Selat Makassar).

Kondisi arus permukaan di Selat Makassar dipengaruhi oleh perubahan angin (angin musim). Tetapi di perairan ini pengaruh Pasifik Barat mulai besar pengaruhnya. Pola arus permukaan (Gambar 7) umumnya bergerak ke utara, pola arus ini akibat pengaruh angin permukaan yang cukup dominan.





Gambar 7. Hubungan Transpor Volume, Komponen Kecepatan Angin Meridional dan Anomali SPL Niño 3.4 pada Tahun El Niño 1997-1998

(a) Tanpa filter (b) Filter 6 bulan (c) Filter 12 bulan

4. Kesimpulan

Variabilitas transpor Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) dan variasi transpor di Selat Makassar diteliti secara detail dengan menggunakan model numerik 3-D POM (*Princeton Ocean Model*) dengan gaya pembangkit adalah angin 1997-1998. Model ini menggambarkan bahwa transpor volume dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia maksimum pada saat menuju musim timur dan menuju minimum pada saat menuju musim barat.

Di Selat Makassar pengaruh angin juga diperlihatkan, dimana nilai maksimum terjadi pada saat menuju musim timur dan minimum pada saat menuju musim barat. Akan tetapi pengaruh Pasifik Barat di perairan ini cukup besar. Pada kejadian El Niño, transpor volume di Selat Makassar melemah dan La Niña transpor volume menguat. Arus bawah permukaan di perairan ini umumnya bergerak ke selatan akibat pengaruh elevasi muka laut di Pasifik Barat lebih tinggi dibandingkan dengan Samudera Hindia. Di permukaan arus umumnya bergerak ke utara akibat pengaruh angin musim.

Daftar Pustaka

- [1] Godfrey, J.S., (1996): "The effect of Indonesian throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere", A Review, *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, No.C5, pp: 12271-12238.
- [2] Gordon, A.L., Susanto, (1999), "ARLINDO Current Meter Mooring", <http://cmdac.oce.orst.edu/>.

- [3] Gordon, A. L., Susanto, R.D., Field, A., Pillsbury, D., (1998), "Makassar strait transport : Preliminary result from Mak-1 & Mak-2", *International WOCENewsletter* 33, pp : 30-32.
- [4] Mahie, A.G., (2005), "Analisis variabilitas Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) diSelat Makassar", *Tesis Magister*, Departemen GM, ITB.
- [5] Mardiansyah, W., (2003), "Analisis dinamika massa air Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) diPerairan Indonesia Bagian Timur", *Tesis Magister*, Departemen Geofisika dan Meteorologi, ITB.
- [6] Mandang, I., (2002), "Model numerik tiga dimensi Barotropik ARLINDO di PerairanIndonesia dan sekitarnya", *Tesis Magister*, Departemen GM, ITB.
- [7] Mellor, G.L., (1998), "*Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*", Revision July 1998, Princeton University, Princeton.
- [8] Meyers, G., (1996), "Variation of Indonesian throughflow and the El Niño-SouthernOscillation", *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, No.C5, pp : 12255-12263.
- [9] Ningsih, N.S., (2000), "Three-dimensional model for coastal ocean circulation&sea floor topography change:Aplication to the Java sea", *Doctoral Thesis inEngineering*, Civil Engineering, Kyoto University, Japan.
- [10] Sprintall, J.*et al.*, (2000), "The Indonesian throughflow:Past, Present and Future monitoring", *J. Geophys. Res.*, **105**, pp : 17217-17230.
- [11] Sudjono, E.H, (2004), "Studi variabilitas Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) diIndonesia", *Tesis Magister*, Departemen GM, ITB.
- [12] Wyrtki, K.A., (1961), "Scientific results of marineinvestigations of the South China sea and the gulf of Thailand 1959–1961", *Naga Report Vol. 2*, TheUniversity of California, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California.