

## Indikasi Fluktuasi Arus Lintas Indonesia di sekitar Selat Makassar Berdasarkan Model Numerik

Evie H. Sudjono)\*, D. K. Mihadja)\*\* dan N. Sari Ningsih)\*\*

\*) Puslitbang Geologi Kelautan, Bandung

\*\*) Program Magister Oseanografi, FIKTM-ITB

### Sari

Arus Lintas Indonesia sering disebut dengan Arlindo, merupakan sirkulasi arus dari Samudera Pasifik menuju Samudera Hindia melalui perairan Indonesia. Sepanjang tahun, Arlindo mengalir dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia, akan tetapi terdapat variabilitas transpor volume. Arlindo dalam perjalanannya masuk ke perairan Indonesia, melalui Selat Makassar. Terdapat fluktuasi Arlindo di Selat Lombok yang mencapai puncaknya pada bulan Juli-Agustus 1985, kemudian berkurang pada akhir bulan Oktober 1985 hingga bulan Januari 1986. Demikian pula hasil pengamatan arus di Selat Makasar dari tahun 1996 hingga tahun 1998, terdapat indikasi arah arus ke utara meskipun tidak signifikan. Berdasarkan hasil penelitian para ahli oseanografi dan meteorologi, fluktuasi nilai transpor berhubungan dengan interaksi atmosfer dan laut. Hasil simulasi model numerik menunjukkan adanya fluktuasi nilai transpor volume di sekitar Selat Makassar, dengan penurunan nilai transpor volume ke arah selatan di sekitar Selat Makassar pada saat terjadi musim dingin di benua Asia. Nilai transpor relatif kecil pada hasil penelitian, yaitu ke arah selatan sebesar 0,5 hingga 0,7 Sv pada bulan Mei-Juni 1989 dan 0,3 Sv pada bulan Oktober tahun 1997. Nilai transpor maksimum ke arah selatan terjadi pada bulan November 1988 sebesar 14,5 Sv, dan bulan Juni 1997 sebesar 11,8 Sv. Nilai transpor berfluktuasi sesuai dengan fasa yang terjadi di Samudera Pasifik ekuatorial, yaitu fasa El Niño atau La Niña.

### Abstract

Indonesian Through Flow (ITF) is the current circulation of Pacific Ocean water to Indian Ocean through the Indonesian Seas. The ITF flows annually from Pacific Ocean into Indian Ocean obtains variability in volume transport. During its journey into Indonesia Seas, ITF passes through Makassar Strait, Java Seas, and Lombok Strait. ITF shows fluctuation in Lombok Strait that reaches its peak in July-Agustus 1985, and decreases in late October 1985 to January 1986. Current observation conducted in Makasar Strait between 1996 and 1998, shows a northward current with no significant value. According to recent oceanography and meteorology researches, transport value fluctuation is associated with sea and atmospheric interaction. Numerical model simulation shows fluctuation in volume transport value in Makassar Strait where the volume decreases southward in Makassar Strait during Asian Continental winter. Transport value in Makassar Strait obtained from this research southward are 0,5 to 0,7 Sv in May-June 1989 and 0,3 Sv in October 1997. The research yielded maximum values of southward transport volume occuring in November 1988 is 14,5 Sv, and June 1997 is 11,8 Sv. Fluctuation transport values is in phase with El Niño or La Niña occuring in equatorial Pacific.

### Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara maritim, dengan jumlah pulau sekitar 13.600 buah. Perairan Indonesia berada di antara dua Samudera dunia, yaitu Samudera India (SI) dan Samudera Pasifik (SP). Para peneliti terdahulu seperti Wyrtki (1961), Gordon (2000), Godfrey (1996), Pickard (1966), Yamagata (1996) dan lain-lain, menyatakan

bahwa terdapat massa air SP yang memasuki SI melalui perairan Indonesia, khususnya perairan Indonesia bagian timur. Massa air yang mengalir ini sering disebut sebagai Arus Lintas Indonesia (*The Indonesian Through Flow*) atau sering disingkat Arlindo. Hasil penelitian dengan pemodelan numerik menyimpulkan bahwa Arlindo menguat ketika terjadi fasa La Niña dan melemah pada fasa El Niño (Idris, 2002). Gordon (1999) menyatakan dari hasil

pengamatan lapangan di Selat Makassar bahwa secara umum Arlindo bergerak ke arah selatan sepanjang tahun, akan tetapi ditemukan adanya arus di selat tersebut yang berarah ke utara tetapi nilainya tidak signifikan. Ketika terjadi La Niña, Indonesia secara umum mengalami musim hujan di atas normal sedangkan ketika terjadi El Niño, sebagian besar daerah Indonesia mengalami musim kemarau (Setiawan, 2002). Hasil penelitian Wiwin (2002), menunjukkan bahwa ketika terjadi La Niña, beda elevasi di SP dengan SI meningkat dari normalnya. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya termoklin di SP bagian barat akibat bergesernya daerah kolam air hangat (*warm pool*) di SP ke barat. Hasil penelitian Setiawan (2002), menunjukkan bahwa selain *El Niño-South Oscillation* (ENSO) dan monsun, perairan Indonesia juga dipengaruhi oleh *Dipole Mode Event* (DME) yang disebabkan oleh perbedaan tekanan antara pantai barat Sumatera dengan pantai timur Afrika.

### Sirkulasi Arus

Wyrtki (1961) telah memulai pengukuran parameter oseano-grafi di sekitar Benua Maritim Indonesia (BMI) dan Teluk Thailand, yang mengacu dari pemikiran bahwa BMI terletak antara SP dan SI dengan variasi monsun yang sangat mempengaruhi iklim dan sirkulasi laut. Hasil penelitian Wyrtki mendeskripsikan adanya sirkulasi arus permukaan bulanan di BMI yang menunjukkan bahwa pada bulan Februari (monsun barat) arus bergerak dari Laut Cina Selatan melalui Selat Karimata menuju Laut Jawa. Kemudian masuk ke SP mengalir melalui selatan Mindanao melalui Laut Sulawesi menuju Selat Makassar, Laut Flores, Laut Banda, Laut Timor dan Laut Arafura. Pada bulan Juni (monsun timur), arus dari SP mengalir melalui Laut Sulu dan Laut Sulawesi, melalui Selat Makassar, Laut Jawa, sebagian masuk Selat Malaka dan Laut Cina Selatan, pulau Luzon, Taiwan dan masuk ke SP ke arah utara.

Pola sirkulasi arus tersebut telah dibuat oleh Godfrey (1996) dengan menggunakan model numerik, yang menjelaskan bahwa aliran massa air utama dari SP menuju SI merupakan arus Mindanao (*Mindanao Current*) yang melalui Laut Sulawesi, Selat Makassar,

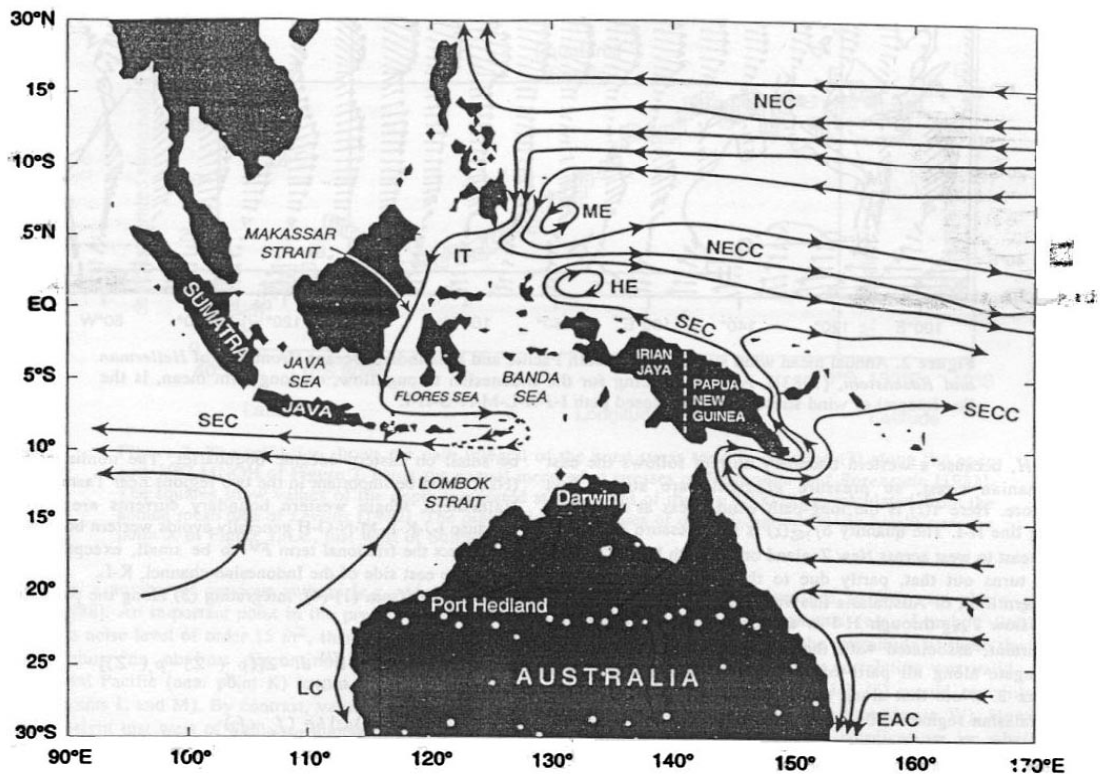
Laut Flores, Laut Banda, dan menuju Laut Timor (**Gambar 1**).

Hasil pengukuran di Selat Makassar (1996-1998) yang digunakan sebagai masukan untuk model numerik, diperoleh hasil yang berbeda dengan Godfrey (Gordon, 2000). Perbedaan tersebut adalah Arlindo selain melalui Laut Timor dan Laut Sulu, arus ini juga melalui Selat Lombok. Akan tetapi baik Godfrey (1996) maupun Gordon (2000) menyatakan bahwa Selat Makassar sebagai jalan masuk utama Arlindo menuju SI.

Pengaruh ENSO melemahkan Arlindo, dan sebaliknya La Niña menguatkan Arlindo (Murray dan Arief, 1988; Meyers, 1996; Fieux et al., 1996; Bray et al., 1996; Gordon, 2000; Idris, 2002). Dengan kata lain dalam perjalanannya Arlindo dapat dipengaruhi oleh El Nino dan La Nina, sehingga nilai transpor volumenya dapat berubah-ubah. Hasil simulasi model numerik dengan menggunakan data angin tahun 1997-1998, diperoleh bahwa nilai transpor volume maksimum pada bulan Juni (monsun timur), dan minimum pada bulan Desember (monsun barat). Pada kondisi ini tidak terdapat aliran yang berarti dan kembali masuk dari Selat Makassar ke SP (Idris, 2002).

### Variabilitas Arlindo

Masumoto dan Yamagata (1996) membahas variasi musiman Arlindo berdasarkan model sirkulasi laut umum. Hasil penelitian menyatakan bahwa nilai transpor rata-rata tahunan Arlindo adalah 9,5 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{det}$ ). Nilai mencapai maksimum pada bulan Agustus sebesar 11,6 Sv dan nilai minimum sebesar 6,0 Sv pada bulan Januari. Hasil penelitian ini menggambarkan bahwa  $\frac{3}{4}$  Arlindo adalah melalui Selat Lombok disebabkan oleh lebar selat yang relatif besar dibandingkan dengan radius lokal internal yaitu sebesar lebih kurang 110 km. Variabilitas Arlindo yang melalui Selat Makassar pada tahun 1997 (fasa El Niño) adalah  $9,3 \text{ Sv} \pm 2,5$ . Nilai transpor rata-rata yang melalui Selat Makassar dari bulan Desember 1997 hingga Februari 1998 (fasa El Niño), adalah sebesar 5,1 Sv. Nilai rata-rata transpor dari bulan Desember 1996 hingga Februari 1997 (fasa La Nina) di selat ini adalah sebesar 12,5 Sv (Gordon, 2000).



**Gambar. 1** Skema sirkulasi arus di BMI  
(Sumber: Godfrey, 1996)

Beberapa hasil penelitian Arlindo terdahulu mengenai nilai variabilitas relatif terhadap waktu dan ruang, telah disajikan dalam **Tabel 1** (Godfrey, 1996). Nilai tertinggi adalah  $18,6 \pm 7$  dengan metode *Geostrophy* di Australia-Bali pada bulan Agustus 1989, yaitu tahun dengan fasa La Niña kuat (Fieux et al., 1994), dan nilai terendah sebesar  $-2,6 \pm 7$  yaitu pada bulan Februari-Maret 1992 (fasa El Niño kuat). Nilai negatif tersebut menunjukkan bahwa terdapat arah arus ke utara sebagai indikasi terjadi fluktuasi transpor volume Arlindo di perairan tersebut yang disebabkan oleh fasa El Nino.

Nilai variabilitas Arlindo berdasarkan model 3 Dimensi barotropik yang mengacu pada *Princeton Ocean Model* (POM) dari Idris (2002) ditunjukkan dalam **Tabel 2** di bawah ini.

Hasil penelitian Bannu (2003), menjelaskan adanya kejadian El Niño yang bersamaan dengan kejadian *positive Dipole Mode* (DM+) pada tahun 1997-1998 dan kejadian La Niña kuat yang bersamaan dengan kejadian *negative Dipole Mode* (DM-) pada tahun 1988-1989. Fasa La Niña lemah terjadi pada bulan

Oktober tahun 1995 hingga Maret 1996 bersamaan dengan DM-. Kesimpulan dari penelitian Bannu (2003) adalah DM+ memperkuat kejadian El Niño, dan DM- memperkuat kejadian La Niña, akan tetapi tidak semua kejadian El Nino bersamaan dengan Dm+ dan kejadian La Niña bersamaan dengan DM-.

### Deskripsi Model dan Aplikasi

Daerah simulasi model adalah pada koordinat  $85^{\circ}\text{BT}$  hingga  $145^{\circ}\text{BT}$  dan pada lintang  $20^{\circ}\text{LS}$  hingga  $25^{\circ}\text{LU}$  (**Gambar 2**). Daerah simulasi model dibagi menjadi beberapa *grid* yaitu sebanyak  $361 \times 271$  sel, dengan ukuran *grid*  $10' \times 10'$  ( $10' \sim 18,5$  km). Secara vertikal dibuat 19 lapisan dalam koordinat *sigma*. Data batimetri diperoleh dari basis data dalam *website* ([http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)). Proses waktu simulasi internal dan eksternal adalah 20 detik dan 1200 detik, dan sebagai gaya pembangkit adalah angin selama 12 jam, yang diperoleh dari basis data dalam *website* ([www.ncep.gov](http://www.ncep.gov)).

**Tabel.1** Variabilitas Arlindo hasil peneliti terdahulu  
(Sumber: Godfrey, 1996)

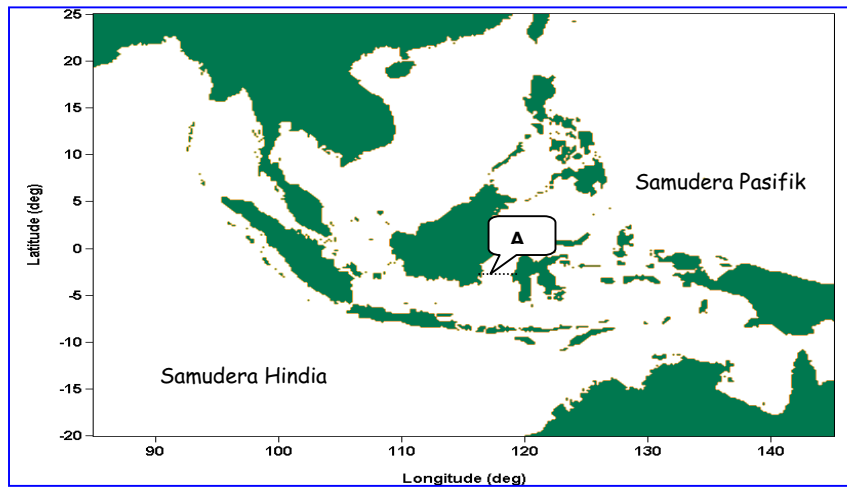
| Reference                  | Method  | Result, $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ | Remarks                          |
|----------------------------|---|---|----------------------------------|
| Wyrki [1961]               | geostrophy  | 1.7                                       | top 200 m                        |
| Godfrey and Golding [1981] | geostrophy, 11 Indian Ocean sections                    | 10  | sections unclosed, 32°S          |
| Wunsch et al. [1983]       | inverse calculation, 43°S and 28°S Pacific sections     | <<10                                      |                                  |
| Piola and Gordon [1984]    | freshwater budget, Pacific and Indian Oceans            | 14  |                                  |
| Fine [1985]                | tritium budget  | 5   | top 300 m                        |
| Fu [1986]                  | inverse calculation, Australia-Timor                    | 7   | Timor Strait only                |
| Toole et al. [1988]        | salinity budget, West Pacific                           | <5  | sensitive to Indonesian salinity |
| Murray and Arief [1988]    | current meter survey                                    | 1.5                                       | Lombok Strait only               |
| Godfrey [1989]             | geostrophy, Australia-Sumatra, Levitus annual mean data | 12  | boundary currents unresolved     |
| Toole and Warren [1993]    | inverse estimate, Indian Ocean 32°S                     | 7   |                                  |
| Wijffels et al. [1992]     | heat budget, closed box, 14°S-165°E-10°N                | 0-8                                       |                                  |
| Fieux et al. [1994]        | geostrophy, Australia-Bali, plus current meters         | 18.6±7                                    | August 1989 snapshot             |
| Fieux et al. [this issue]  | geostrophy, Australia-Bali, plus current meters         | -2.6±7                                    | February-March 1992 snapshot     |
| Meyers et al. [1995]       | time series from expendable bathythermograph sections   | 5   | top 400 m                        |

**Tabel. 2** Variabilitas Arlindo berdasarkan model barotropik POM  
(sumber: Idris, 2002)

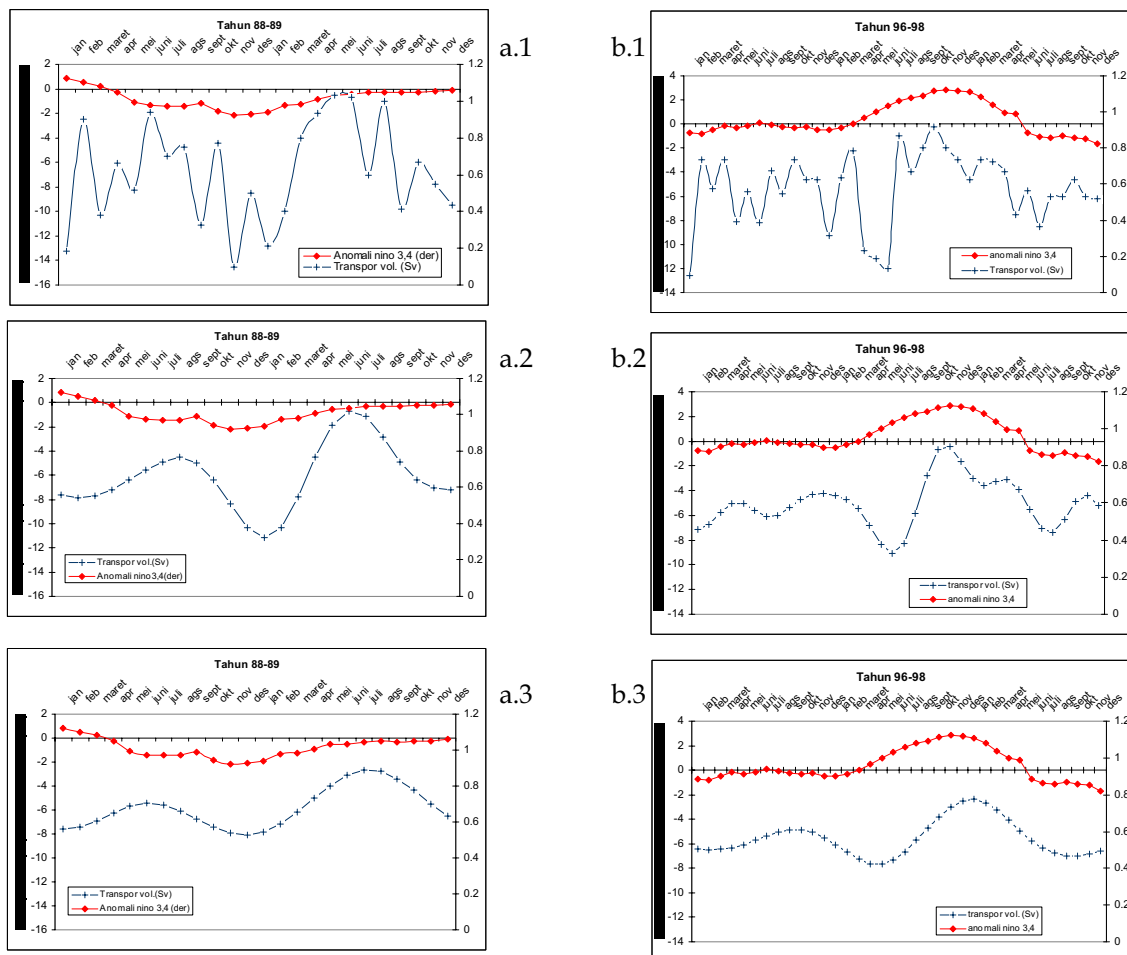
| Transpor Sv | Tahun          | Keterangan  |
|-------------|----------------|-------------|
| 10,37±1,05  | 1997 (El Nino) | Arlindo     |
| 14,60±4,22  | 1998 (La Nina) | Arlindo     |
| 5,2±4,3     | 1997 (El Nino) | S. Makassar |
| 5,4±1,7     | 1998 (La Nina) | S. Makassar |

Penghitungan transpor volume pada penampang A di sekitar Selat Makassar yaitu untuk mengetahui variabilitas Arlindo yang melalui Selat Makassar (**Gambar 2**). Hasil perhitungan diplot dengan anomali suhu permukaan laut di niño 3,4 kemudian difilter 6 bulan dan 12 bulan untuk menghilangkan variasi bulanan dan 6 bulanan, dari penampang tersebut ditunjukkan bahwa hasil negatif menyatakan arah arus ke selatan (**Gambar 3.a dan b**).

Model diaplikasikan pada tahun 1997-1998, 1996, dan 1988-1989. Berdasarkan data indeks anomali suhu permukaan laut (SPL) di Niño-3, dapat diketahui bahwa pada bulan April 1988 hingga bulan April 1989 adalah fasa La Niña. Pada tahun 1996 diasumsikan sebagai tahun normal, sedangkan pada bulan April 1997 hingga bulan Mei 1998 adalah fasa El Niño.



Gambar 2. Peta lokasi perhitungan volume transpor A. Selat Makassar



Gambar 3. Variabilitas Arlindo di Selat Makassar dan hubungannya terhadap ENSO  
a.1 tanpa filter a.2 filter 6 bulan a.3 filter 12 bulan (88-89)  
b.1 tanpa filter b.2 filter 6 bulan b.3 filter 12 bulan (96-98)

Periode bulan Juni hingga bulan Desember 1998 adalah fasa La Niña lemah. Model variabilitas Arlindo tersebut hasilnya ditunjukkan dalam model penampang di bawah ini (**Gambar 3**).

## Hasil dan Diskusi

Hasil simulasi menunjukkan adanya indikasi penurunan nilai transpor volume di sekitar Selat Makassar menjadi relatif kecil yaitu sebesar 0,5 hingga 0,7 Sv pada bulan Mei-Juni tahun 1989 (**Gambar 3.a1**) dan sebesar 0,3 Sv pada bulan Oktober tahun 1997 (**Gambar 3.b1**). Hasil nilai transpor maksimum terjadi pada bulan November 1988 sebesar 14,5 Sv (fasa La Niña dan peralihan II), dan Juni 1997 sebesar 11,8 Sv yaitu pada fasa El Niño dan monsun timur (**Gambar 3.a1 dan 3.b1**). Hasil Nilai transpor berfluktuasi sesuai dengan fasa yang terjadi di SP ekuatorial yaitu pada fasa El Niño dan La Niña. Pada tahun 1996 nilai transpor volume maksimum pada waktu monsun timur dan tahun normal adalah sebesar 8,2 Sv yang terjadi pada bulan Juni, sedangkan minimum pada bulan Februari yaitu sebesar 3 Sv pada waktu monsun barat dan tahun normal (**Gambar 3.a1**). Nilai transpor volume pada tahun 1997 mencapai minimum terjadi pada bulan Oktober sebesar 0,3 Sv, yaitu pada fasa El Nino dan peralihan II (**Gambar 3.b1**). Hasil ini menunjukkan bahwa nilai transpor volume maksimum dan minimum terjadi pada peralihan II (September-November) hanya saja yang membedakan adalah fasa yang terjadi SP ekuatorial, yaitu El Niño atau La Niña. Rata-rata transpor volume selama La Niña kuat antara April 1988 hingga April 1989 adalah sebesar 7,22 Sv. Di samping itu nilai rata-rata transpor pada fasa El Niño dari bulan April 1997 hingga bulan Mei 1998 adalah 4,87 Sv, sedangkan pada fasa La Niña lemah yang terjadi pada bulan Juni hingga Desember 1998 adalah sebesar 5,81 Sv. Terlihat jelas nilai transpor volume sangat dipengaruhi fasa El Niño atau La Niña yang terjadi di daerah anomali niño-3.

Hasil simulasi model yaitu sebesar 4,87 Sv ternyata lebih kecil daripada hasil pengamatan di lapangan pada tahun 1998 yaitu sebesar 5,1

Sv pada fasa El Niño (Gordon, 2000). Terdapat selisih sekitar 0,2 Sv sehingga dapat dikatakan bahwa hasil model cukup baik dan mendekati hasil pengamatan di lapangan. Hasil simulasi menunjukkan fluktuasi yang cukup besar, baik pada tahun 1988, 1989, dan antara 1996-1998. Jika kita perhatikan ternyata nilai transpor volume sangat dipengaruhi oleh EÑSO dan pengaruh monsun meskipun telah difilter selama 6 dan 12 bulan (**Gambar 3.a2,a3 dan 3.b2,b3**).

Berkaitan dengan kejadian *Dipole Mode*, meskipun menurut Bannu (2003) pada tahun 1988,1989, 1996, 1998 terjadi DM- yang bersamaan dengan fasa La Niña, akan tetapi untuk dapat mengkaji lebih lanjut diperlukan metode lain, misalnya dengan analisis *wavelet*.

Hasil simulasi model sirkulasi Arlindo ternyata yang sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya menunjukkan fluktuasi Arlindo sangat bergantung pada fasa EÑSO maupun La Niña (Murray dan Arief, 1988; Meyers, 1996; Fieux et al., 1996; Bray et al., 1996; Gordon, 2000; Idris, 2002). Di lain pihak ENSO merupakan hasil proses interaksi laut dan atmosfer di Samudera Pasifik ekuatorial, yaitu di daerah anomali suhu permukaan laut Niño (Wang dan Zhang 1999).

## Kesimpulan dan Saran

Hasil simulasi menunjukkan adanya indikasi penurunan nilai transpor volume di sekitar Selat Makassar mencapai minimum sebesar 0,3 Sv pada bulan Oktober tahun 1997 bersamaan dengan fasa El Niño kuat dan peralihan II. Nilai transpor maksimum terjadi pada bulan November 1988 sebesar 14,5 Sv terjadi bersamaan dengan fasa La Niña kuat dan peralihan II. Hasil Nilai transpor berfluktuasi sesuai dengan fasa yang terjadi di Samudera Pasifik ekuatorial, yaitu fasa El Niño atau La Niña.

Untuk mengetahui hubungan antara ENSO dan transpor volume maka sebaiknya dibuat korelasi antara keduanya, sedangkan untuk mengetahui hubungan transpor volume dan DME, diperlukan kajian lebih lanjut, misalnya dengan analisis *wavelet*.

## **Daftar Pustaka**

- Bannu, 2003, Analisis interaksi monsun, eño, dan dipole mode serta kaitannya dengan variabilitas curah hujan dan angin permukaan di benua maritim Indonesia, Tesis magister, Program pasca sarjana, ITB.
- Bray, N.A., S. Hautala, J. Chong and Pariwono, 1996, Large scale sea level, thermocline, and wind variations in the Indonesia throughflow region. *Journal of Geophysical Research*, vol.101, No.C5, hal. 12239-12254.
- Godfreys, 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, hal. 12271-12238.
- Gordon, A. L., dan Susanto, R. D., 1999, Makassar strait transport: Initial estimate based on Arlindo result, *Marine technology society*, hal. 32-34.
- Gordon, A. L., dan Susanto, R. D., Ffield, A., Pillsbury, D., 1998, Makassar strait transport: Preliminary result from Mak-1 and Mak-2, *International WOCE Newsletter* 33, hal. 30-32.
- Idris, 2002, Model numerik tiga dimensi barotropik Arlindo di perairan Indonesia dan sekitarnya, Tesis magister, Program pasca sarjana, ITB.
- Meyers, G., 1996, Variation of Indonesian throughflow and the El Niño South oscillation, *Journal of Geophysical Research*, vol.101, No.C5, hal. 12255-12263.
- Murray, S. P., and Arief, D., 1988, Throughflow into the Indian ocean through the Lombok strait, January 1985 -January 1986, *Nature*, 333, hal. 444-447.
- Pickard, G. L., and Emery, W. J., 1982, *Descriptive physical oceanography*, Pergamon Press, hal. 185-211.
- Setiawan, A., 2002, Analisis variabilitas parameter meteorologi-oseanografi di benua maritim Indonesia dalam hubungannya dengan interaksi antara fenomena monsun, eño, dan dipole mode, Tesis magister, Program pasca sarjana, ITB.
- Wang, B., and Zhang, Q., 1996, Pacific-east asian teleconnection, part II: How the Philippine sea anticyclon established during development of El Niño, *Journal Climate*, vol. 15, hal. 3252-3265.
- Windupranata, W., 2002, Analisis topografi paras laut di perairan Indonesia serta daerah ekuator Samudera Hindia dan Samudera Pasifik, Tesis magister, Program pasca sarjana, ITB.
- Wyrtki, K., 1961, *Physical Oceanography of the Southeast asian waters*, *Naga Report*, vol. 2, Univ. Of California, Scripps Institution Oceanography, La Jolla, California. ❖