

Identifikasi Awal *Eddies* di Perairan Laut Jawa

Title

Dominic Oki Ismoyo dan Mutiara R. Putri

Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan

Institut Teknologi Bandung

Email: ocean916@gmail.com, mutiara.putri@gmail.com

Abstrak

Kuatnya sistem monsun membuat Laut Jawa cenderung homogen dari lapisan permukaan hingga dasar perairan. Namun pada musim peralihan, pada saat monsun melemah, deformasi serta *eddy* dapat timbul di Laut Jawa. Algoritma *Okubo-Weiss (OW)* digunakan untuk menganalisis kinematika perairan Laut Jawa dari data mingguan anomali muka laut, sedangkan data angin NCEP Reanalisis harian digunakan untuk menganalisis pengaruh angin pada muka laut. Wilayah pengamatan mencakup Laut Jawa selama musim peralihan pada bulan April-Mei dan Oktober-November Tahun 2011. Metode *OW* menunjukkan bahwa proses deformasi lebih dominan terjadi dibandingkan proses vortisitas di perairan Laut Jawa. Deformasi yang terjadi pada 12 Oktober 2011 di lokasi sekitar 5-6 LS dan 113-114 BT mempunyai nilai tegangan normal -0.23407 dan tegangan geser memberikan nilai 0.3725 yang menyebabkan pergerakan ke arah utara dari posisi yang semula berada di sebelah selatan 6.5 LS tanggal 12 Oktober ke posisi 6 LS di tanggal 19 Oktober. Analisis data angin juga menunjukkan hasil yang serupa dengan analisa muka laut. Dari identifikasi awal ini eddies di Laut Jawa tergolong *sub-mesoscale* dengan skala kejadian 1-7 hari dengan luas area antara 50-100 km.

Kata kunci: Anomali muka laut, *eddy*, *Okubo-Weiss*, *sub-mesoscale*, deformasi, tegangan normal

Abstract

Strong monsoon system at Java Sea produce a relatively homogeneous sea from the surface layer to the bottom waters. But in the transition season, when monsoon weakened, deformation and eddy could occur in the Java Sea. Okubo-Weiss (OW) algorithm is used to analyze the kinematics of the Java Sea waters using weekly data of sea level anomaly, whereas the NCEP reanalysis daily wind data are used to analyze the effect of the wind on the sea surface. Observations encompass the Java Sea region during the transitional season in April-May and October-November of 2011. OW method showed that the deformation process is more dominant than the vortices occur in the waters of the Java Sea. Deformation that occurred on October 12, 2011 at locations around 5-6 S and 113-114 E has a normal strain value of -0.23407 and shear stress gives the value 0.3725 which led to movement to the north of the position which was originally located in the 6.5 S on October 12th to the position of 6 S on October 19. Wind data analysis also showed similar results to the analysis of sea surface. From this initial identification, the Java Sea eddies are classified onto sub mesoscale events with its temporal scale is 1-7 days and its coverage area is between 50-100 km.

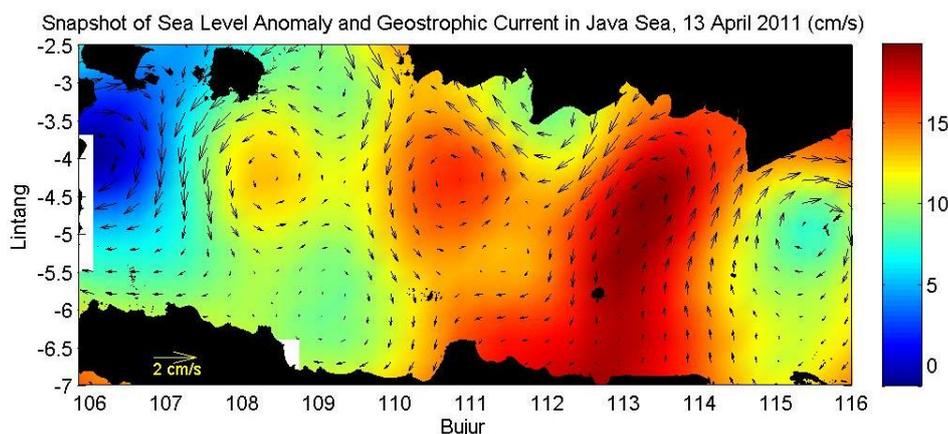
Keywords: Sea level anomalies, Eddy, Okubo-Weiss, sub mesoscale, Deformation, normal strain

Pendahuluan

Potret sesaat dari topografi permukaan laut pada satu waktu tertentu yang didapatkan dari kombinasi pengolahan berbagai macam satelit *altimetry* yang memperlihatkan beberapa variasi ketinggian muka laut dengan variasi ketinggian muka laut berada pada rentang -50 hingga 50 cm seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Perbedaan ketinggian muka laut tersebut dapat menyebabkan pergerakan air yang pada akhirnya dapat memicu terbentuknya sebuah *eddy* (Fontanet *et al*, 2002).

Wyrтки (1961) menyatakan bahwa Laut Jawa merupakan perairan yang cenderung homogen bila dilihat dari kondisi dasar perairannya yang hampir seragam dan karakteristik perairannya yang cenderung berganti bolak balik sesuai musim. Walaupun demikian,

Wyrтки mengindikasikan *eddies* di Laut Jawa dapat terbentuk pada musim-musim peralihan ketika angin permukaan bertiup tidak menentu. Kuatnya faktor perubahan musim pada wilayah Laut Jawa ini membuat potensi *eddies* menarik untuk dikaji untuk memahami informasi dan karakteristik secara lengkap dari dinamika arus *eddy* di Laut Jawa menggunakan analisa data satelit altimetri dan data angin permukaan. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi terbentuknya *eddies* di perairan Laut Jawa dan karakteristiknya. Hipotesa yang dikemukakan pada penelitian ini adalah *eddy* dapat terjadi di Laut Jawa pada musim-musim peralihan yang teridentifikasi oleh anomali muka laut dan kecepatan angin. Karakter dari *eddy* yang terbentuk tersebut sangat dipengaruhi oleh perubahan musim yang terjadi di Laut Jawa.



Gambar 1. Profil topografi muka laut di Laut Jawa (Sumber Data : AVISO (<http://aviso.oceanobs.com>))

Bahan dan Metoda

Data Altimetri

Data topografi muka laut yang digunakan bersumber dari AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>) berupa data grid SLA yang dipilih dari hasil ramuan dari berbagai data satelit *altimetry* seperti *Topex/Poseidon*, *Jason-1*, *Envisat*, *GFO* dan *ERS*. Data SLA mengacu terhadap rata-rata tinggi anomali muka laut selama tujuh tahun. Data ini tersedia dari tahun 1997 hingga Desember 2012. Resolusi yang dipilih beresolusi sedang yaitu $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ pada *grid Mercator* yang dapat diambil setiap bulannya. Data yang digunakan adalah data pada bulan Januari 2011 hingga Desember 2011 setiap minggunya. Data altimetri ini kemudian digunakan untuk menghitung keseimbangan antara Gaya *Coriolis* dengan gradien tekanan, yang menghasilkan kecepatan geostropik komponen permukaan laut. Komponen ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan dengan data dari ketinggian muka laut SLA (Stewart, 2005) yaitu:

$$U_s = -\frac{g}{f} \frac{\partial(SLA)}{\partial y} \quad \text{dan} \quad V_s = -\frac{g}{f} \frac{\partial(SLA)}{\partial x} \quad (1)$$

Dengan demikian, nilai kecepatan amplitudo geostropik (\bar{V}) didapatkan dengan:

$$\bar{V} = \sqrt{U_s^2 + V_s^2} \quad (2)$$

Nilai energi kinetik (EK) dapat dihitung dari komponen kecepatan dengan menggunakan:

$$EK = \frac{1}{2} (U_s^2 + V_s^2) \quad (3)$$

Untuk menyelidiki karakteristik dari *eddy* yang terbentuk di Laut Jawa dilakukan dengan menggunakan parameter *Okubo-Weiss* (Okubo, 1977; Weiss, 1991) yang melakukan perhitungan komponen vortisitas dan deformasi. Dalam sistem koordinat kartesian, gradien dari komponen geostropiknya dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$g_{11} = \frac{\partial U_s}{\partial x}; \quad g_{12} = \frac{\partial U_s}{\partial y}; \quad g_{21} = \frac{\partial V_s}{\partial x}; \quad g_{22} = \frac{\partial V_s}{\partial y} \quad (4)$$

Menggunakan gradien ini, vortisitas relatif dapat ditentukan dengan:

$$\omega = g_{21} - g_{12} \quad (5)$$

Sebuah medan aliran dinyatakan irrotasional bila nilai $\omega = 0$. Laju deformasi geser (atau komponen geser dari tegangan) dengan:

$$s_s = g_{21} + g_{12} \quad (6)$$

Laju deformasi peregangan (komponen normal dari tegangan) dengan:

$$s_n = g_{11} - g_{22} \quad (7)$$

Deformasi total:

$$s = \sqrt{s_s^2 + s_n^2} \quad (8)$$

Dan divergensinya, (efek dari divergensi kecepatan horizontal pada vortisitas):

$$\psi = g_{11} + g_{22} \quad (9)$$

Perumusan diatas kemudian digunakan untuk menentukan *eddy* berdasarkan kriteria fisis yang mengungkapkan tegangan dan vortisitas dalam sebuah aliran dengan formulasi *Okubo-Weiss*:

$$OW = s_s^2 + s_n^2 - \omega^2 \quad (10)$$

Dimana arti simbol persamaan (4)-(10) adalah sebagai berikut:

g_{11} = Perubahan komponen kecepatan U_s terhadap arah x

g_{12} = Perubahan komponen kecepatan U_s terhadap arah y

g_{21} = Perubahan komponen kecepatan V_s terhadap arah x

g_{22} = Perubahan komponen kecepatan V_s terhadap arah y

- ω = Komponen vortisitas relatif
- S_s = Komponen deformasi geser
- S_n = Komponen deformasi regang
- S = Komponen deformasi total
- ψ = Komponen divergensi
- OW = Parameter Okubo -Weiss

Sebuah vorteks didefinisikan sebagai sebuah wilayah yang mempunyai nilai vortisitas yang sama dan dengan nilai parameter *Okubo Weiss* (OW) yang lebih kecil dari nilai ambang batas:

$$OW_0 = 0.2\sigma_w \tag{11}$$

dimana nilai σ_w adalah nilai standar deviasi spasial dari OW . Nilai kecepatan geostropik yang diturunkan dari data SLA dapat digunakan untuk menghitung σ_w pada tiap waktu dan kontur tertutup dari $OW = -OW_0$ merupakan tanda dari sebuah *eddy*. Melalui parameter OW pada persamaan (10) topologi dari kecepatan permukaan laut dapat dibagi menjadi tiga tipe wilayah:

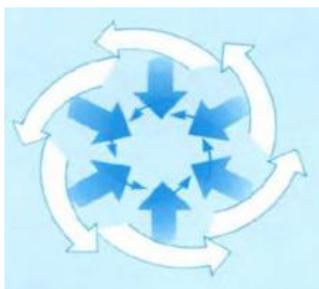
1. Wilayah Eliptik ($OW < -OW_0$), atau merupakan wilayah yang didominasi oleh vortisitas
2. Wilayah Hiperbolik ($OW > OW_0$), atau merupakan wilayah yang didominasi oleh tegangan/deformasi

Wilayah bidang dasar ($|OW| \leq OW_0$)

Data Angin Permukaan

Data angin yang digunakan dalam studi ini adalah data angin permukaan 10 meter yang didapatkan dari NCEP Reanalysis 1. Data yang diambil merupakan data analisis 6 jam-an selama periode Januari hingga Desember 2011. Data NCEP *Reanalysis* mempunyai resolusi spasial yang cukup rendah yaitu $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ namun mempunyai resolusi temporal yang bagus yaitu setiap 6 jam. Pada daerah studi yang tidak terlalu besar, resolusi data spasial yang rendah berisiko menyebabkan ambiguitas dari analisa pengolahan data yang dihasilkan.

Gaya friksi yang bekerja pada permukaan laut sebagai akibat dari angin yang berhembus disebut



dengan stress angin. Stress angin (τ) dapat ditentukan dari kecepatan angin dengan menggunakan perumusan (Stewart, 2005):

$$\tau = C_D \rho_u U_{10}^2 \tag{12}$$

dalam bentuk komponen-x dan komponen-y masing-masing sebagai berikut:

$$\tau_x = C_D \rho_u |U|u^2 \tag{13}$$

$$\tau_y = C_D \rho_u |U|v^2 \tag{14}$$

Ketika stress angin menghasilkan zona divergensi pada permukaan air, air yang lebih dalam menggantikan posisi air di permukaan (*upwelling*). Sebaliknya ketika angin menghasilkan zona konvergensi pada permukaan air, air di permukaan tenggelam ke lapisan bawah (*downwelling*). Transport massa yang ditimbulkan oleh stress angin ini berarah sedikit menyimpang dari arah angin dan disebut dengan Transport Ekman. Pada BBS Gaya *Coriolis* membelokkan arah arus ke sebelah kiri dari arah angin. Timbulnya *eddy* di permukaan laut dapat dipicu oleh pergerakan Transport Ekman yang dapat membuat suatu area menjadi lokasi massa air yang konvergen atau divergen menurut arah transportnya. ([http://marine.rutgers.edu\(2004\)](http://marine.rutgers.edu(2004))):

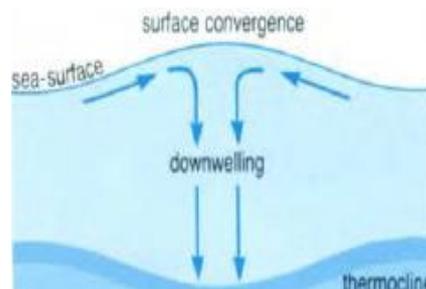
$$V_e = -\frac{\tau_x}{\rho f}; U_e = \frac{\tau_y}{\rho f} \tag{15}$$

Dengan V_e dan U_e adalah Transport Ekman pada arah sumbu-y dan pada arah sumbu-x.

Pergerakan horizontal ini diseimbangkan oleh gaya *coriolis* yang menyebabkan perbedaan arah antara arah angin dengan arah arus permukaan. Sedangkan proses pergerakan vertikal sebagai respon dari pergerakan massa air horizontal disebut dengan *Ekman Pumping* (Gambar 2).

Perumusan stress angin sebagai kecenderungan dari vektor angin untuk menimbulkan rotasi dinyatakan dengan nilai *Curl* Angin (τ) sebagai berikut:

$$\tau = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \tag{16}$$



Gambar 2. Ilustrasi dari vektor angin yang berotasi dan menimbulkan konvergensi pada permukaan laut sebagai respon dari stress angin yang terbentuk di BBS. (Sumber: Open University Team. 2004).

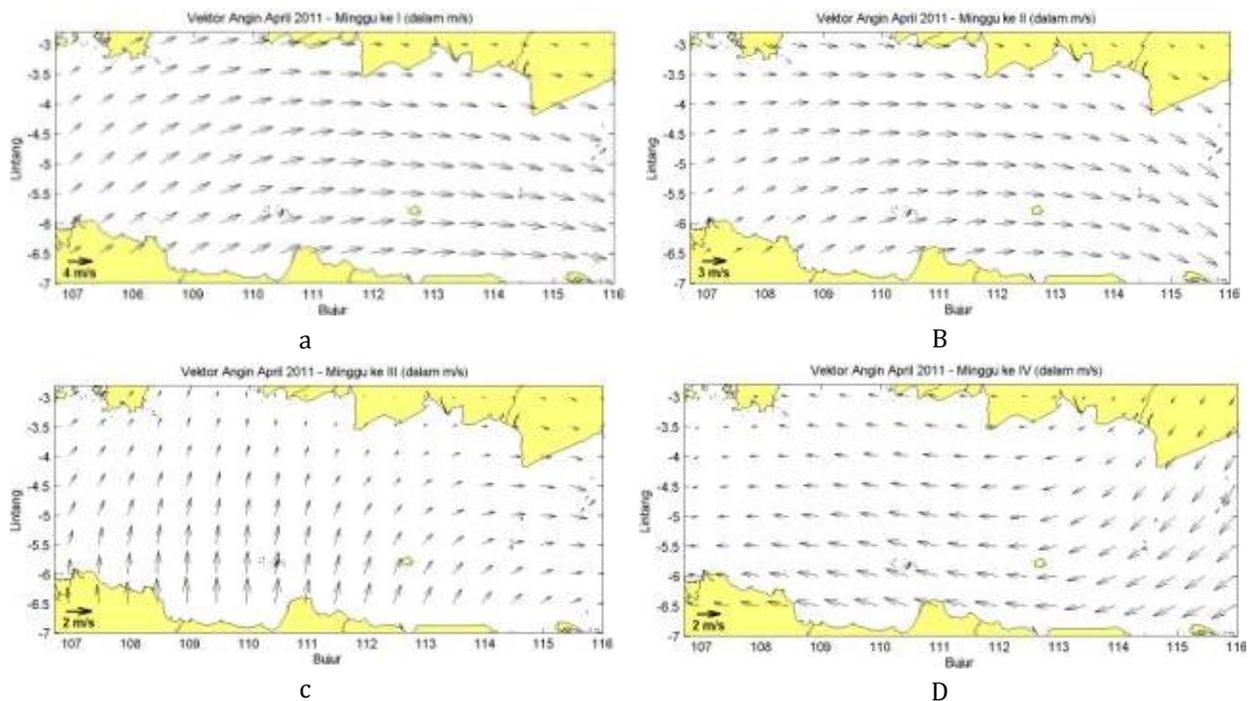
Hasil dan Pembahasan

Data angin mingguan menunjukkan variasi yang kecil dari vektor angin yang berpotensi untuk menimbulkan *eddy*. Minimnya potensi *eddy* oleh angin ini disebabkan stabilnya arah dan magnitudo angin pada waktu-waktu tersebut (Gambar 3).

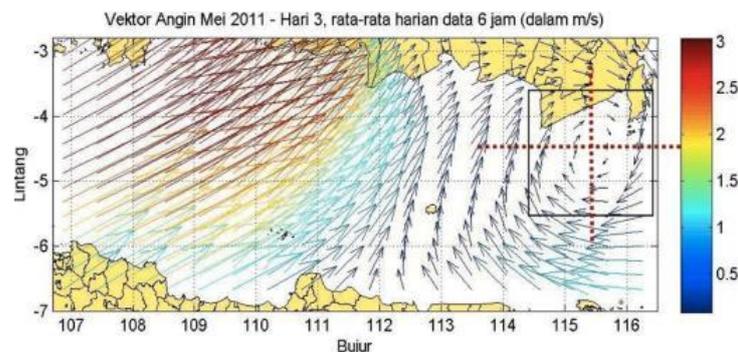
Untuk menyelidiki lebih mendalam keterkaitan dari gaya pembangkit angin dengan muka laut diperlukan data dengan resolusi temporal yang lebih baik, sehingga pengolahan data angin dipilih menjadi analisa harian yang diperluas hingga per 6 jam. Sedangkan untuk analisa elevasi muka laut dapat menggunakan analisa tiap mingguan karena perubahan variasi

tiap minggunya masih dapat terlacak dan teridentifikasi dengan baik.

Pada musim-musim peralihan I dan II angin musim yang dominan digantikan oleh angin lokal dengan magnitudo yang lebih kecil dan arah tidak menentu atau sering berubah arah. Pada beberapa waktu di daerah studi bahkan terdapat angin-anjin yang berhembus dengan arah saling berlawanan. Pada kejadian seperti ini, dimana terdapat angin-anjin yang berhembus dengan arah yang berlainan dan saling bersinggungan dapat berpotensi menghasilkan kondisi vektor angin yang saling berotasi seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Contoh profil angin permukaan mingguan pada Bulan April 2011. (Data : NCEP Reanalysis).



Gambar 4. Indikasi daerah *eddy* oleh vektor angin pada Laut Jawa

Pada tanggal tersebut (3 Mei 2011) di selatan Kalimantan (4.5 LS - 115.5 BT) terjadi vektor angin yang berotasi. Pengolahan data angin harian sepanjang tahun 2011 menunjukkan bahwa terdapat 22 hari yang berpotensi sebagai lokasi terbentuknya *eddy* di Laut Jawa seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 di bawah menunjukkan bahwa indikasi *eddy* terbanyak terjadi pada musim peralihan I di Bulan April dan Mei, kemudian potensi tersebut muncul lagi pada musim peralihan II di Bulan Oktober dan November. Hal ini sesuai dengan pendapat Wyrtki (1961) yang menyatakan bahwa *eddies* di Laut Jawa dapat muncul pada

musim peralihan. Dengan demikian, pengolahan data selanjutnya difokuskan pada kedua musim peralihan tersebut yaitu pada Bulan Maret, April, Mei, Oktober dan November, khususnya di tanggal-tanggal yang berpotensi. Pada hari-hari yang berpotensi tersebut, data angin per 6 jam dan data SLA mingguan kemudian dilihat untuk menyelidiki pembangkitan dan potensi dari *eddy* tersebut.

Perhitungan Transport Ekman pada bulan-bulan peralihan ini memberikan petunjuk bahwa angin permukaan memberikan kontribusi pada terbentuknya *eddy* di permukaan laut.

Arah pergerakan arus permukaan yang ditimbulkan angin dapat menunjukkan adanya potensi aliran arus permukaan yang berotasi. Hal ini terlihat pada contoh di Bulan Oktober tanggal 6. Pada jam ke 12 dan jam ke 24 (Gambar 5a dan Gambar 5b), terdapat indikasi vektor angin yang divergen pada sisi selatan Kalimantan dan konvergen pada Pulau Bawean. Vektor angin yang divergen pada menghasilkan nilai stress angin yang positif dan vektor angin yang konvergen menghasilkan nilai stress angin yang negatif. Lokasi dengan nilai stress angin negatif mengindikasikan bahwa lokasi tersebut dapat terjadi *downwelling*. Sedangkan lokasi dengan nilai stress angin yang positif menunjukkan bahwa lokasi tersebut dapat terjadi *upwelling*.

Arah pergerakan arus permukaan yang ditimbulkan angin dapat menunjukkan adanya potensi aliran arus permukaan yang berotasi. Hal ini terlihat pada contoh di Bulan Oktober tanggal 6. Pada jam ke 12 dan jam ke 24 (Gambar 5a dan Gambar 5b), terdapat indikasi vektor angin yang divergen pada sisi selatan Kalimantan dan konvergen pada Pulau Bawean. Vektor angin yang divergen pada menghasilkan nilai stress angin yang positif dan vektor angin yang konvergen menghasilkan nilai stress angin yang negatif. Lokasi dengan nilai stress angin negatif mengindikasikan bahwa lokasi tersebut dapat terjadi *downwelling*. Sedangkan lokasi dengan nilai stress angin yang positif menunjukkan bahwa lokasi tersebut dapat terjadi *upwelling*.

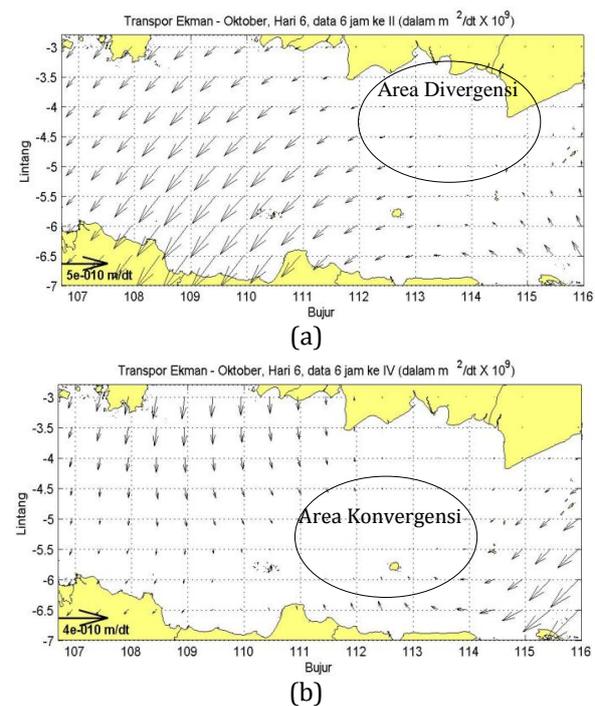
Arah transport Ekman yang antisiklonik memang berpotensi menimbulkan *downwelling*, namun nilai dari transport yang kecil (lebih kecil dari $0.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) tersebut membuktikan bahwa potensi pergerakan *downwelling* tersebut hanya dapat terjadi dalam waktu yang singkat dan sesaat dan berenergi lemah. Pada semua kejadian pergerakan arus Ekman pada area studi di tahun 2011 memberikan nilai stress angin dan transport ekman yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan daerah lainnya.

Pada Tabel 2 terlihat nilai parameter fisis dari medan kecepatan di Laut Jawa pada musim peralihan tahun 2011. Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai *OW* rata-rata pada daerah studi mempunyai nilai *OW* positif. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada musim peralihan di Laut Jawa tahun 2011 lebih didominasi oleh parameter

deformasi dibandingkan dengan vortisitas. Namun, pada beberapa area didapatkan nilai *OW* yang negatif dan masih memenuhi kriteria untuk terbentuknya *eddy*. Nilai deformasi yang dihasilkan memberikan petunjuk bahwa baik nilai komponen deformasi geser (*Ss*) atau komponen normal didominasi oleh nilai yang negatif dibandingkan nilai positif, terutama pada Bulan April dan November. Dengan demikian, arah pergerakan deformasi geser pada area studi tersebut bersifat ekstensi/kompresi ke arah Timur Laut-Barat Daya dan Barat Laut-Tenggara. Sedangkan nilai komponen regang (*Sn*) lebih didominasi oleh nilai yang positif dibandingkan yang negatif. Nilai komponen regang yang positif memberikan indikasi bahwa deformasi regang yang terjadi pada daerah tersebut mempunyai kecenderungan ekstensi/kompresi ke arah barat-timur dan utara-selatan.

Tabel 1. Jumlah indikasi hari *eddy* selama Tahun 2011

Bulan	Jumlah Indikasi Hari Eddy	Tanggal
Januari	0	
Februari	1	12
Maret	3	18, 19, 24
April	7	13, 19, 20, 21, 22, 29, 30
Mei	4	3, 4, 5, 15
Juni	0	
Juli	0	
Agustus	0	
September	0	
Oktober	3	6, 23, 31
November	4	12, 16, 20, 30
Desember	0	
Total	22	



Gambar 5. Profil Transport Ekman pada 6 Oktober 2011

Beberapa posisi *eddy* yang ditunjukkan oleh metode *OW* ini dapat dilihat pada 25 Mei dan 26 Oktober 2011 sebagai perwakilan dari musim peralihan I dan musim peralihan II, yang ditunjukkan dengan lingkaran bulat pada Gambar 6.

Pada tanggal 25 Mei terdapat 4 buah *eddy* (Gambar 6) di Laut Jawa yang berkesesuaian dengan tinggi anomali muka laut, sedangkan pada 26 Oktober terdapat 6 buah *eddy* yang

berkesesuaian dengan tinggi anomali muka laut. *Eddy* yang terbentuk tanggal 25 Mei ini merupakan *eddy* yang cukup kecil yang terlihat dari diameternya yaitu sekitar 45 km bagi *eddy* nomor 2 dan 4. Sedangkan bagi *eddy* nomor 1 dan 3 mempunyai diameter yang cukup besar yaitu sekitar 100 km. Nilai amplitudo dari SLA pada *eddy* tanggal 25 Mei ini menunjukkan nilai 15 cm pada maksimumnya di *eddy* 1 dan -2 cm minimumnya pada *eddy* 2 di selatan Kalimantan.

Tabel 2. Kinematika nilai fisis di Laut Jawa pada musim peralihan 2011

Bulan	Tanggal	Vortisitas	Deformasi Geser (Ss)	Deformasi Regang (Sn)	Deformasi Total	OW	Standar Deviasi OW	Limit OW
Februari	9	0.0027	-0.034	0.0034	0.0585	0.002	0.0129	-0.026
	16	0.0016	4.35E-04	0.0065	0.00647	0.002	0.0172	-0.0034
	23	4.62E-04	-0.0106	0.0074	0.0254	0.0029	0.0254	-0.051
Maret	16	-0.13191	0.0038	0.2524	1.56	0.8256	6.3932	-1.2786
	23	-0.3255	-0.003	0.3633	1.9938	2.5861	8.465	-1.6973
	30	-0.0253	-0.1331	0.1573	1.812	1.5301	7.3487	-1.4697
April	6	-0.0702	-0.1371	0.1567	1.5827	1.8695	4.575	-0.915
	13	-0.0128	-0.0501	0.0792	1.2833	0.6351	1.9751	-0.395
	20	0.0884	0.0157	0.0156	1.301	0.2323	2.1995	-0.4399
	27	-0.0342	-0.0392	0.0165	1.2521	0.6888	2.3298	-0.466
Mei	4	-0.1773	-0.0248	7.14E-05	2.0642	1.7851	6.0552	-1.211
	11	-0.1473	0.0567	0.0107	1.9721	1.6618	8.5607	-1.7121
	18	0.0236	0.0366	-0.1606	1.7339	0.815	8.2794	-1.6559
	25	-0.039	0.1137	2.73E-02	1.7509	1.141	3.7271	-0.7454
Oktober	5	0.1029	0.0608	-0.0764	1.1332	0.7812	2.4008	-0.4802
	12	-0.0065	0.0915	-0.028	1.1191	0.6013	3.0549	-0.611
	19	0.0768	6.57E-02	-0.1108	1.3341	0.9357	3.5444	-0.7089
	26	1.17E-01	-0.0643	-0.1329	1.3331	0.638	1.8238	-0.3648
November	2	-0.184	-0.0369	0.3675	1.7707	3.7569	23.3431	-4.6686
	9	-0.155	-0.0283	0.347	1.6793	2.1937	7.8144	-1.5629
	16	-0.0194	0.0466	0.2162	1.6775	0.9182	4.1711	-0.8342
	23	0.0301	-0.0722	0.1606	1.6541	1.1718	8.23	-1.646
	30	-0.0025	-0.1509	0.2043	1.8264	2.6248	15.5782	-3.1156

Deformasi Muka Laut Oleh Angin Permukaan

Analisa angin permukaan yang berurutan pada Laut Jawa menunjukkan hasil yang berkaitan dengan topografi muka laut. Angin yang berhembus di muka laut dapat memberikan kontribusi bagi variasi muka laut. Pada daerah studi, seperti terlihat pada Gambar IV.10 nilai *curl* stress angin dapat menghasilkan zona yang cenderung mengarah pada divergensi atau konvergensi di muka laut. Pada tanggal 18-19 Oktober 2011 di Gambar 10 terdapat nilai *curl* stress angin negatif yang cukup besar di tengah Laut Jawa yaitu di sekitar 110-113 BT dan 4-6 LS.

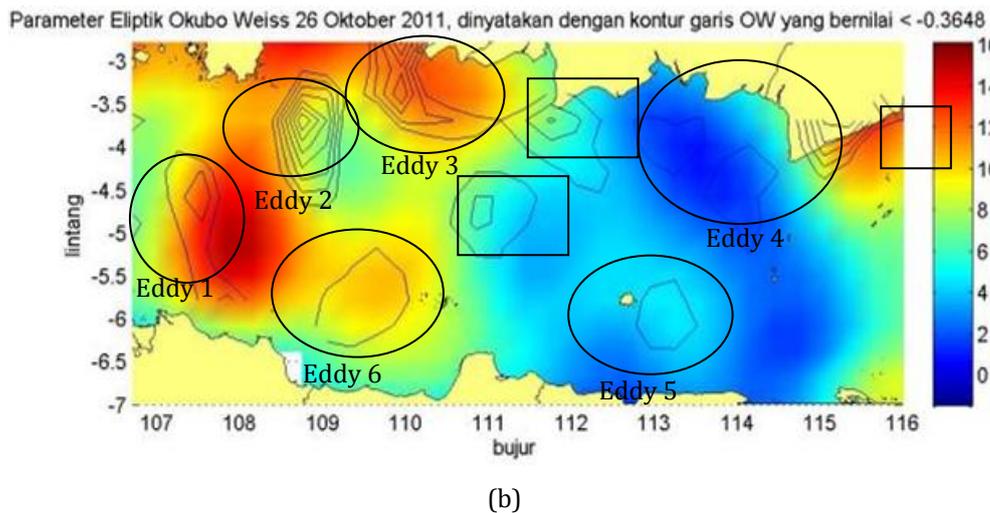
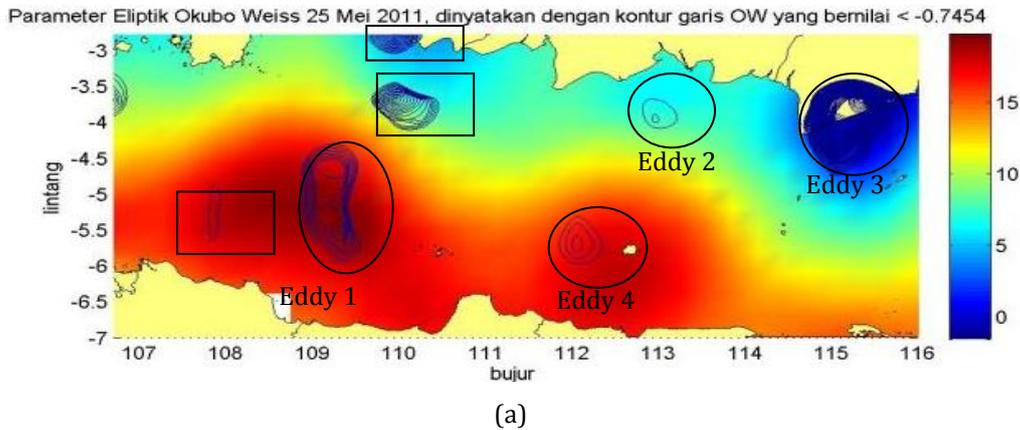
Nilai dari zona penumpukan/pengosongan massa yang dibangkitkan oleh angin pada waktu sebelumnya juga memberikan petunjuk mengenai deformasi/vortisitas yang dapat mengarah pada terbentuknya *eddy* di permukaan laut. Pada Gambar 8b dan 8c terlihat bahwa pada posisi lintang 5-6 LS dan 113-114 BT (sebelah timur P. Bawean) terdapat zona konvergensi yang kecil (-0.005 N/m^2) yang ditandai dengan kontur tertutup. Kondisi ini sesuai dengan rekaman *altimetry* tanggal 19 Oktober yang menunjukkan muka laut yang sedikit menaik (7.1 cm) pada posisi mirip dengan zona *curl* stress angin yaitu di 5.5 - 6.5 LS dan 112.5 - 114 BT (sebelah tenggara P. Bawean).

Rekaman *altimetry* juga menunjukkan konsistensi yang mirip dalam skala waktu 1 minggu. Nilai topografi muka laut antara tanggal 12 dan 19 Oktober 2011 menunjukkan kemiripan pada daerah yang dimaksud ($\pm 5-6 \text{ LS}$ dan 113-114 BT). Pada 12 Oktober (Gambar 7) nilai tegangan geser pada lokasi tersebut memberikan nilai 0.3725 dan nilai tegangan normalnya -0.23407. Nilai absolut kedua tegangan tersebut memberikan indikasi bahwa nilai tegangan geser lebih berpengaruh pada arah pergerakannya dibandingkan dengan nilai tegangan normalnya. Nilai tegangan normal yang negatif mengindikasikan ekstensi/kompresi dalam arah Utara-Selatan. Sedangkan nilai tegangan geser yang positif menunjukkan ekstensi/kompresi dalam arah timur laut - barat daya. Dengan demikian dapat terlihat pergerakan *eddy* ke arah Timur Laut-Utara dari posisi yang berada dekat 6.5 LS pada tanggal 12 Oktober dapat bertambah luas ke Utara-Timur pada posisi dekat 6 LS di tanggal 19 Oktober (Gambar 9) terjadi karena pengaruh komponen tegangan gesernya.

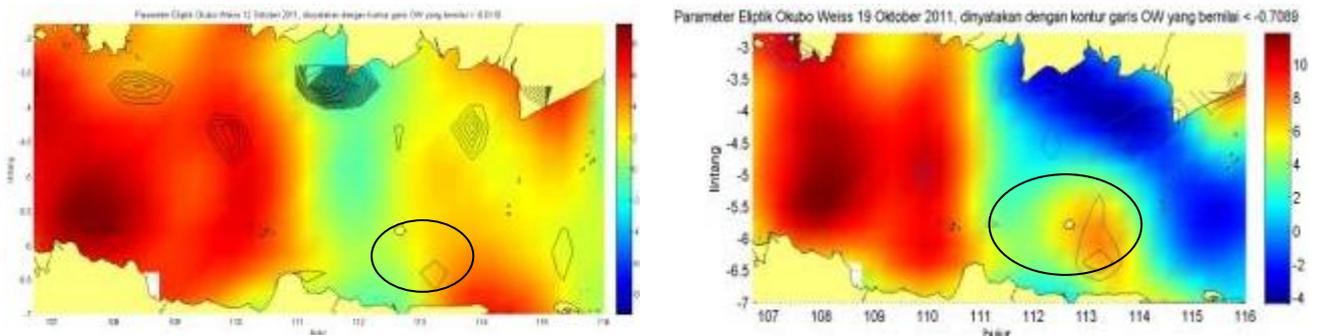
Pada tanggal 19 Oktober nilai deformasi pada *eddy* di Timur P. Bawean mempunyai nilai deformasi normal -0.46483 dan deformasi gesernya -0.06396.

Hal ini berarti bahwa *eddy* yang sebelumnya didominasi oleh tegangan geser berganti dengan didominasi oleh tegangan normal. Nilai tegangan normal yang negatif menunjukkan bahwa *eddy* tersebut akan semakin berekstensi/kompresi dalam arah Utara-Selatan. Nilai parameter *OW* pada *eddy* ini juga menunjukkan perkembangan dimana pada tanggal 12 Oktober terlihat bahwa *eddy*

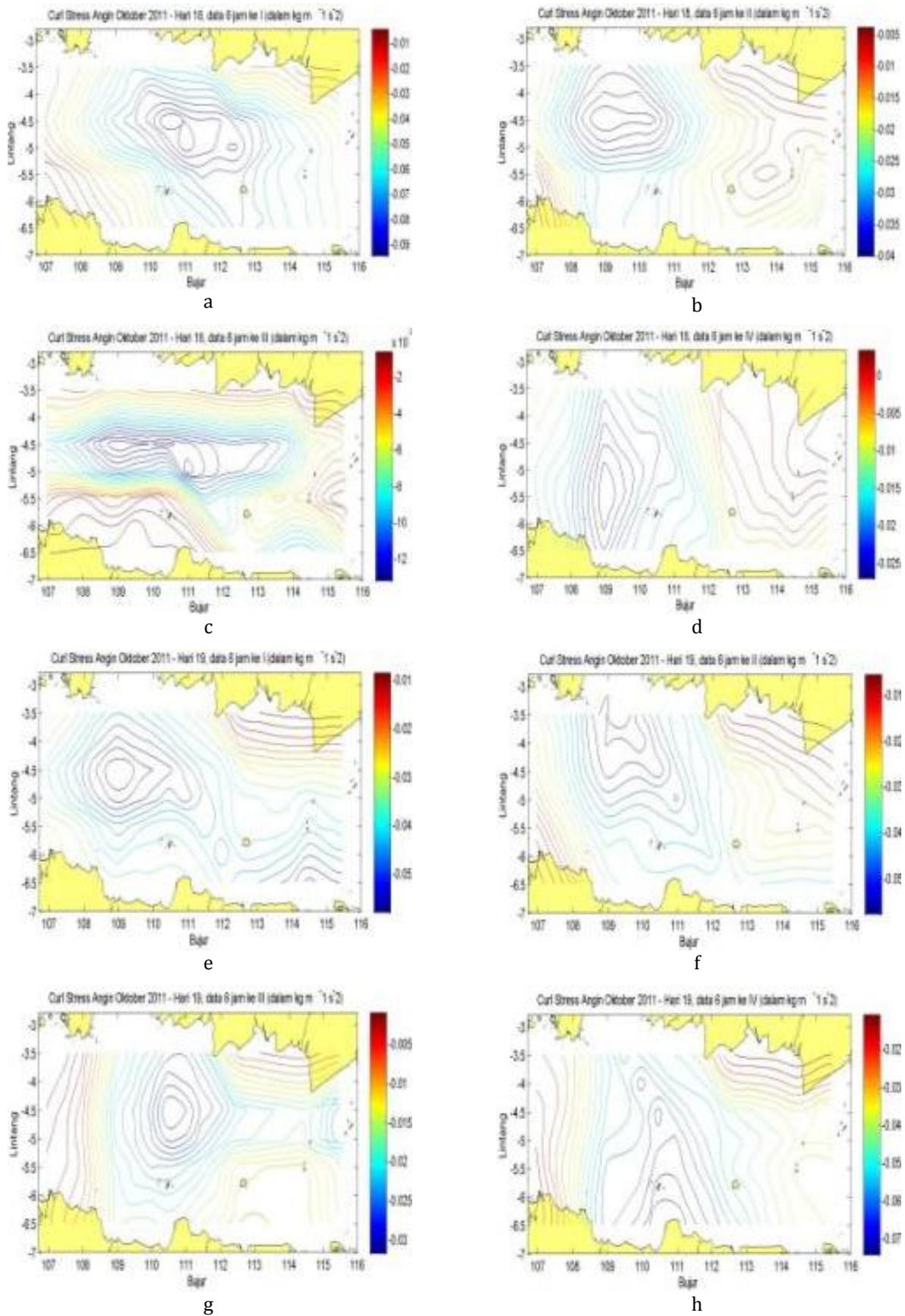
tersebut mempunyai nilai *OW* rata-rata (-0.53262) yang melampaui limit standar deviasi *OW* = -0.611 dan nilai maksimal *OW* adalah -1.2451, sedangkan tanggal 19 Oktober nilai *OW* rata-ratanya menjadi semakin besar yaitu -1.9884 yang melampaui limit standar deviasi *OW* = -0.7089 dan mempunyai nilai maksimum *OW*-nya adalah -5.398.



Gambar 6. Indikasi *eddy* oleh parameter Okubo-Weiss



Gambar 7. Perkembangan *eddy* pada Pulau Jawa bagian utara.



Gambar 10. Grafik *Curl Stress* angin (N/m^2) pada 18-19 Oktober 2011

Kesimpulan

Hasil studi dari identifikasi *eddies* di Laut Jawa memberikan kesimpulan bahwa nilai

topografi muka laut yang maksimum/minimum di Laut Jawa tidak berkaitan langsung sebagai bukti sebuah *eddy*. Metode *Okubo-Weiss* yang diterapkan

kadang tidak berkesesuaian dengan nilai topografi muka laut yang maksimum/minimum. Komponen deformasi dan vortisitas dari metode *Okubo-Weiss* menunjukkan hubungan yang erat dengan nilai topografi muka laut dan parameter *OW*. Komponen deformasi ini menunjukkan bahwa pada Laut Jawa dapat terbentuk *eddy* yang dipengaruhi oleh ekstensi/ kompresi dari parameter deformasinya. Deformasi permukaan laut yang terjadi pada Laut Jawa juga menunjukkan adanya potensi resirkulasi komponen arlindo yang masuk dari arah Selat Makassar dan masuk ke Laut Jawa di daerah daerah perairan Kalimantan Selatan. Studi selanjutnya mengenai resirkulasi arlindo dengan air di Laut Jawa dapat menambahkan keterangan lengkap mengenai dinamika *eddy* yang terjadi di Laut Jawa.

Studi ini menunjukkan bahwa *eddy* di Laut Jawa dapat terjadi pada musim-musim peralihan dan sangat dipengaruhi oleh anomali muka laut dan kecepatan angin. Pada musim normal (bukan peralihan) tidak terbentuk *eddy* di Laut Jawa karena angin yang berarah konstan. Variabilitas angin yang mengindikasikan *eddy* pada Laut Jawa merupakan hasil dari analisa per 6 jam hingga harian. Analisa angin dan topografi muka laut secara berurutan memungkinkan untuk melihat perkembangan dan pembangkitan *eddy* yang terbentuk di Laut Jawa. Nilai stress angin dan transport ekman yang rendah menunjukkan sebuah indikasi *eddy* yang lemah yang terjadi di Laut Jawa. Sehingga *eddy* yang terbentuk pada lokasi-lokasi di Laut Jawa tersebut tergolong ke dalam kategori *sub-mesoscale*. Hasil analisa angin permukaan dan komponen deformasi permukaan laut oleh parameter *OW* menunjukkan bahwa *eddy* di Laut Jawa dapat terbentuk pada musim peralihan namun mempunyai energi yang kecil dan berumur pendek. Studi yang mendalam mengenai arus permukaan di Laut Jawa serta adanya pengukuran profil vertikal perairan dapat melengkapi hasil penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Bakun, A. 2006. Fronts And Eddies As Key Structures In The Habitat Of Marine Fish Larvae: Opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*. 7052. 105 – 122. ISSN : 0214 -8358.
- Chaigneau, et al. 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79: 106-119.
- Chelton, D.B. and M.G. Schlax. 2001. The Accuracies of Smoothed Sea Surface Height Fields Constructed from Tandem Satellite Altimeter Datasets. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 1276-1302.
- Durand, J.R., and Widodo, J. 1995. Java Sea fisheries, a provisional approach. in *BIODYNEX: Biology, Dynamics, Exploitation of the Small Pelagic Fishes in the Java Sea*. M. Potier and S. Nurhakim (eds.), AARD/ORSTOM. 273275.
- Durand, J.R., and Widodo, J. 1995. The Java Sea environment. in *BIODYNEX: Biology, Dynamics, Exploitation of the Small Pelagic Fishes in the Java Sea*. M. Potier and S. Nurhakim (eds.), AARD/ORSTOM. 14-38.
- Fontanet, J.I., Ladona, E.G., and Font, J. 2002. Identification of Marine Eddies From Altimetric Maps. *Journal of Atmospheric And Oceanic Technology*. Vol 20: 772-778.
- Gill, A. E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press. San Diego, CA.
- Gordon, A.L., Susanto, R.D., and Vranes, K. 2003. Cool Indonesian Throughflow As A Consequence Of Restricted Surface Layer Flow. *Nature*. Vol. 425: 824-828.
- Kartadikaria, A.R., Miyazawa, Y., Nadaoka, K., and Watanabe, A. 2012. Existence of Eddies at Crossroad of the Indonesian Seas. *Ocean Dynamics*. 62:31-44.
- Mann, K.H., and Lazier, J.R.N. 2006. *Dynamics Of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions In The Ocean*. 3rd edition. Blackwell Publishing.
- Morrow, R., and Birol, F., et al. 2004. Divergent Pathways of Cyclonic and Anticyclonic Eddies. *Geophysical Research Letters*. Vol. 31: L24311.
- Martono. 2008. Studi Eddy Mindanao Dan Eddy Halmahera. *Karya Tesis S2 ITB*.
- Suratno dan Siswanto. 2008. Simulasi Pengaruh Angin Terhadap Sirkulasi Permukaan Laut Berbasis Model. *Seminar Nasional Aplikasi Sains dan Teknologi – IST AKPRIND*. Yogyakarta.
- Putri, M.R. 2005. Study of Ocean Climate Variability (1959-2002) in the Eastern Indian Ocean, Java Sea and Sunda Strait Using the Hamburg Shelf Ocean Model. *Doctoral Thesis*. University of Hamburg
- Qu, T., Du, Y., Strachan, J., Meyers, G., Slingo, J. 2005. Sea Surface Temperature And Its Variability In The Indonesian Region. *Oceanography*. Vol. 18(4).
- Wyrtki, K. 1961. Scientific Results of Marine Investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961. *Naga Report*, 2. University of California, Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, California.