

Dinamika Penjalaran Gelombang Internal di Selat Lombok

Rima Rachmayani^{1*}, Nining Sari Ningsih¹, Safwan Hadi¹ dan Irsan S. Brodjonegoro²

¹Program Studi Oseanografi, Institut Teknologi Bandung

² Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia,

Fax. +62-22-2534139, Phone. +62-22-2505253/+62 856 218 52 51

E-mail: rhyme@geoph.itb.ac.id

Abstrak

Gelombang internal merupakan mekanisme yang dapat mempengaruhi perubahan ekosistem dan sebagai pembangkit utama yang dapat memenuhi kebutuhan energi untuk proses pencampuran vertikal di laut terbuka. Model hidrodinamika tiga dimensi (3D) baroklinik non-hidrostatik digunakan untuk memahami mekanisme pembangkitan dan penjalaran gelombang internal, serta mempelajari variasinya terhadap musim di Selat Lombok. Hasil simulasi model yang dilakukan pada 4 musim menunjukkan kesesuaian dengan hasil pengamatan citra satelit ERS - SAR (ERS – Synthetic Aperture Radar) yaitu terdeteksinya keberadaan gelombang soliton di bagian utara dan selatan Selat Lombok. Amplitudo gelombang internal (soliton) sebesar 64-285 m (20-88 m) di bagian selatan, dan 50-300 m (25-81 m) di bagian utara. Panjang gelombang internal (soliton) di sisi utara berkisar 10,9-90 km (0,9-14,6 km) dan di selatan sill 12,4-15,8 km (0,3-11,6 km). Kecepatan propagasi gelombang soliton lebih besar di bagian utara daripada di selatan, yaitu berkisar 0,21-2,67 m/det (di utara) dan 0,21-1,53 m/det (di selatan). Hasil simulasi model juga menunjukkan adanya massa air hangat yang masuk dari Samudera Pasifik melalui selat Lombok menuju Samudera Hindia dan membentuk well-developed thermal plume, yaitu sejauh 29,9-66,2 km dari sill di bagian selatan. Hal ini sesuai dengan hasil citra satelit ERS I - II pada waktu penelitian yang sama untuk masing-masing musim.

Kata kunci: non-hidrostatik, soliton, propagasi, citra satelit, thermal plume.

Abstract

Internal waves are motions that occur beneath the free-surface of a density-stratified water body, which carry energy and momentum that prompt changes of marine ecosystem. The generation and propagation mechanisms of internal waves with their monsoonal variation in the Strait of Lombok have been studied by using the three-dimensional (3D) baroclinic hydrodynamic model with the non-hydrostatic approximation in 4 seasons. The simulation results showed a good agreement with observations captured by the SAR from the ERS satellite, namely the detection of solitary waves in the Strait of Lombok. Internal (solitary) wave amplitudes are 64-285 m (20-88 m) at the southern part of Lombok Strait and 50-300 m (25-81 m) at the northern one. Wavelengths of internal (solitary) waves are 10.9-90 km (0.9-14.6 km) at north of the sill and 12.4-15.8 km (0.3-11.6 km) at south of it. Propagation speeds of northward propagating internal solitary waves (0.21-2.67 m/s) are stronger than southward propagating ones (0.21-1.53 m/s). Similar to observations made by ERS I - II satellites, the simulation results also showed the existence of well-developed thermal plume at south of the sill with the distance of about 29,9-66,2 km to the sill in the similar years for every seasons.

Key words: non-hydrostatic, solitary waves, propagation, satellite image, thermal plume.

Pendahuluan

Studi pembangkitan dan penjalaran gelombang internal di laut telah menjadi pusat perhatian dalam beberapa dekade terakhir ini. Pemahaman mengenai proses pembangkitan dan penjalaran gelombang internal merupakan hal yang penting untuk dikaji

dalam bidang ilmu oseanografi (Venayagamoorthy & Fringer, 2006).

Usaha-usaha untuk mempelajari dinamika gelombang internal tidak hanya dimotivasi oleh kepentingan dari aspek ekonomis tetapi juga dari segi perkembangan ilmu pengetahuan karena masih

banyaknya mekanisme pembangkitan dan penjaran gelombang internal, khususnya di perairan Indonesia, yang belum terungkap.

Gelombang internal merupakan salah satu mekanisme yang membawa energi dan momentum serta memicu proses pencampuran (*mixing*) di laut yang selanjutnya dapat mempengaruhi perubahan ekosistem (Munk & Wunsch, 1998; Wadzuk, 2004). Percobaan lapangan yang dilakukan oleh Ledwell *et al.*, (1998), Polzin *et al.*, (1997), dan Kunze & Toole (1997) telah mendukung pernyataan yang menyebutkan bahwa gelombang internal merupakan pembangkit utama yang dapat memenuhi kebutuhan energi untuk proses pencampuran vertikal yang terjadi di laut terbuka. Sehingga kegiatan perikanan tangkap maupun budidaya di suatu perairan perlu memperhatikan dampak yang diberikan gelombang internal terhadap sektor tersebut dimana eksistensinya menyebabkan air dingin dan unsur hara yang berada di dekat dasar laut bergerak ke lapisan permukaan (dinamika nutrien). Selain itu, perencanaan aktivitas eksploitasi minyak dan gas di lepas pantai tidak bisa dilepaskan dari kajian mengenai dampak yang diberikan oleh gelombang internal terhadap kinerja anjungan (*platform*) lepas pantai, karena energi yang dibangkitkannya dapat menimbulkan daya rusak yang sangat besar terhadap bangunan-bangunan yang berada di laut. Osborne & Burch (1990) mengungkapkan dampak kerugian yang disebabkan oleh gelombang internal beramplitudo sebesar 105 meter pada tiang penyangga anjungan minyak di Laut Andaman. Lebih lanjut, gelombang internal dapat mengganggu keamanan navigasi dan propagasi gelombang akustik bawah laut.

Beberapa pengamatan menunjukkan amplitudo gelombang internal sangat besar, antara lain sebesar 40-105 m di Laut Andaman (Massel, 1999; Osborne & Burch, 1990), kurang lebih 90 m di Selat Gibraltar dan lebih besar dari 100 m di Selat Lombok (Susanto *et al.*, 2005).

Penelitian mengenai dinamika gelombang internal telah dilakukan di beberapa perairan Indonesia, khususnya di Selat Lombok (Jaharuddin, 2004; Sulaiman, 2004; Visser, 2004; Ningsih *et al.*, 2004; Susanto, 2005; Arvelyna and Oshima, 2006). Selat Lombok merupakan salah satu rute terpenting dalam pergerakan ARLINDO (Arus Lintas Indonesia) dan di selat ini terdapat arus pasut yang kuat yang berinteraksi dengan *sill* yang terletak di bagian selatan selat. Karena adanya stratifikasi, *sill*, dan arus pasut yang kuat, Selat Lombok dikarakterisasi sebagai tempat

pembangkitan gelombang internal intensif dan tempat yang ideal untuk mempelajari dinamika gelombang internal.

Materi dan Metode

Pemodelan hidrodinamika untuk mempelajari dinamika sirkulasi massa air di daerah pesisir dan laut pada umumnya menggunakan pendekatan hidrostatis yang berlaku untuk model laut skala besar dimana daerah kajian dari grid horizontalnya (Δx) jauh lebih besar dari grid vertikal (Δz) dengan orde *ratio* ($\Delta z / \Delta x$) sebesar 10^{-3} dan karakteristik kecepatan vertikalnya jauh lebih kecil dari kecepatan horizontalnya, sehingga percepatan dalam arah vertikal dapat diabaikan (Wadzuk, 2004).

Gelombang permukaan di laut dalam diasumsikan memiliki karakteristik linier dan dapat dipelajari dengan pendekatan hidrostatis, sementara itu gelombang internal diasumsikan memiliki sifat nonlinear yang sangat tinggi, sehingga perlu dipelajari dengan pendekatan *non-hydrostatic* agar proses fisis dari evolusi gelombang internal menjadi paket-paket soliton dapat dimodelkan (Gerkema & Zimmerman, 1995; Brandt *et al.*, 1996; Wadzuk, 2004). Dalam penelitian ini digunakan model hidrodinamika baroklinik 3D *non-hydrostatic* yang merupakan modifikasi dari model *MITgcm* (*Massachusetts Institute of Technology - Global Circulation Model*) yang telah dibangun oleh Hill & Marshall (1995), Marshall *et al.*, (1997); Adcroft *et al.*, (1997); Adcroft & Marshall (1998); Hill & Marshall (1998); Marotzke *et al.*, (1999); Adcroft & Campin (2004); Adcroft *et al.*, (2004); Marshall *et al.*, (2004).

Di dalam model *MITgcm*, persamaan pembangun ditentukan dengan mengaplikasikan persamaan Boussinesq dan Navier-Stokes yang ditulis dalam koordinat vertikal z yang diselesaikan dengan pendekatan beda hingga (*finite difference*):

Persamaan Kontinuitas:

$$\nabla_h \cdot \vec{v}_h + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Persamaan Momentum horizontal:

$$\frac{D\vec{v}_h}{Dt} + f\hat{k} \times \vec{v}_h + \frac{1}{\rho_c} \nabla_h p' = F \quad (2)$$

Persamaan Momentum vertikal:

$$\epsilon_{nh} \frac{Dw}{Dt} + \frac{g\rho'}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho'}{\partial z} = \epsilon_{nh} F_w \quad (3)$$

Persamaan Keadaan:

$$\rho' = \rho(\theta, S, p_o(z)) - \rho_c \tag{4}$$

Persamaan Temperatur Potensial:

$$\frac{D\theta}{Dt} = Q_\theta \tag{5}$$

Persamaan Salinitas:

$$\frac{DS}{Dt} = Q_s \tag{6}$$

Dimana:

- θ : temperatur potensial
- : Salinitas
- ρ : Densitas
- : Gradien horizontal
- \bar{v}_h : Kecepatan horizontal
- : Disipasi temperatur
- Q_s : Disipasi salinitas
- w : Kecepatan vertikal
- : Densitas referensi
- ϵ_{nh} : Parameter *non-hydrostatic*
- ρ' : Variasi densitas
- : Tekanan referensi
- z : Kedalaman
- \bar{F} : Gaya yang berekerja untuk kecepatan horizontal
- : Gaya yang berekerja untuk kecepatan vertikal
- f : Parameter Coriolis

Daerah model meliputi area dari 7,3-9,5° LS pada satu lintasan transek seperti yang terlihat pada Gambar 1. Daerah tersebut dibagi dalam ukuran grid $\Delta x = 100$ m (arah barat-timur), $\Delta y = 12000$ m (arah selatan-utara). Simulasi dilakukan dengan $\Delta t = 0,5$ detik pada 4 musim, yaitu musim peralihan 1 (20-30 April 1996), musim timur (19-29 Agustus 1997), musim peralihan 2 (1-10 November 1997), dan musim barat (10-20 Desember 1999).

Gaya pembangkit pasut diberikan di syarat-syarat batas terbuka. Data pasut di batas diperoleh dari hasil prediksi 8 komponen pasut dengan menggunakan TMD (*Tidal Model Driver*). Untuk melihat kelayakan model dilakukan verifikasi hasil simulasi elevasi pada Musim Peralihan 1 dengan hasil data pengamatan Susanto *et al.* (2005) seperti terlihat pada Gambar 2.

Pemilihan waktu simulasi dipilih sedemikian rupa agar regim fluida pada saat kondisi pasut purnama maupun perbani dapat tersimulasikan. Sedangkan pemilihan waktu simulasi pada setiap musimnya, diambil bersesuaian dengan pengamatan citra satelit yang mendeteksi keberadaan soliton di bagian utara (sekitar Pulau Kangean) dan selatan Selat Lombok. Syarat awal yang digunakan untuk parameter temperatur (θ), sekaligus sebagai parameter untuk menentukan kedalaman *interface* (h_i) adalah data Levitus WOA98 (<http://iridl.ldeo.columbia.edu>), dimana nilainya untuk musim peralihan 1, timur, peralihan 2 dan barat berturut-turut 175, 150, 225, dan 250 m.

Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi model menunjukkan hampir pada seluruh kolom air di Laut Flores maupun di Samudera Hindia terdapat zona konvergensi dan divergensi yang secara teori berhubungan dengan fenomena *upwelling* pada zona divergensi dan *downwelling* pada zona konvergensi (Gambar 3-Gambar 6). *Isotherm* pada badan air teragitasi menyerupai rambatan gangguan yang beresilasi seperti layaknya gelombang permukaan dengan adanya puncak dan lembah gelombang. Dari hasil simulasi terlihat gelombang internal berevolusi menjadi soliton pada jarak beberapa km dari daerah pembangkitan di sebelah utara maupun di selatan. Selain di dekat daerah pembangkitan, gelombang internalpun berevolusi di dekat Pulau Kangean. Pada semua kondisi pasut, terdapat gerakan mengikuti *sill* yang mengganggu presisi *isotherm* dari kesetimbangannya ditandai dengan adanya pengangkatan (*uplift*) *isotherm* di dekat *sill* di selatan dan di utara *sill*. Sebagai konsekuensinya, ada lapisan lain yang terdepresi atau permukaan *isotherm*nya berubah yang disebabkan oleh gerakan arus dari utara atau dari selatan *sill*.

Agitasi gelombang internal sangat kuat di bagian selatan *sill* berkesesuaian dengan kemiringan *sill* yang curam. Kemiringan *sill* yang tajam memberikan potensi refleksi energi gelombang yang besar sehingga menyebabkan agitasi *isotherm* (pada bidang *interface*) yang nyata. Pada kedalaman 100 m, sebaran temperatur di utara dan di selatan cenderung lebih dingin daripada di bagian tengah selat, hal ini diduga terjadi karena adanya fenomena *uplift* yang mengangkat massa air dingin dari lapisan dalam.

Musim Peralihan 1 (April)

Sebaran temperatur pada bulan ini berkisar 6-32,59 °C. Evolusi gelombang internal menjadi soliton

Tabel 1. Nilai parameter hasil simulasi pada Musim Peralihan 1, Musim Timur, Musim Peralihan 2, dan Musim Barat

Musim	Amplitudo gelombang Internal (m)	Internal (km)	Amplitudo gelombang soliton (m)	soliton (km)	Jumlah soliton	Kec propagasi (m/s)	Thermal Plume (km)
Peralihan 1	285 (S) 78 (N)	14,6 (S) 33,4 (N)	30-88 (S) 25-81 (N)	0,9-7,1 (S) 0,9-10,8 (N)	7-10 (S) 9 (N1) 10 (N2) 6 (N3)	0,27-1,44 (S) 0,77-2,67 (N)	32,1
Timur	64 (S) 300 (N)	14,6 (S) 10,9 (N)	20-80 (S) 60-80 (N)	0,3-11,6 (S) 0,9-14,6 (N)	6 (S) 10 (N1) 5 (N2) 8 (N3)	0,21-0,69 (S) 2,46 (N)	29,9
Peralihan 2	250 (S) 50-60 (N)	15,8 (S) 75,4 (N)	80 (S) 64 (N)	1,64- 7,6 (S) 2-10,4 (N)	10 (S) 10 (N1) 12 (N2) 5 (N3)	0,28-1,53 (S) 1,72-2,66 (N)	66,2
Barat	90 (S) 50 (N)	12,4 (S) 90 (N)	80 m (S) 63 m (N)	3,6-5,5 (S) 6,3-8,7 (N)	10 (S) 10 (N1) 12 (N2) 6 (N3)	0,3-0,98 (S) 0,71-2,58 (N)	42,6

Keterangan : N : di bagian utara *sill*, S : di bagian selatan *sill*, N1 : paket gelombang soliton pertama di bagian utara *sill*, N2 : paket gelombang soliton kedua di bagian utara *sill*, N3 : paket gelombang soliton ketiga di bagian utara *sill*

terekam pada citra ERS 1 pada 02:32 UTC, 23 April 1996 seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Pada saat pasang tertinggi pumama, arus bergerak ke Laut Flores dengan kecepatan maksimum 1,96 m/s di dekat *sill*. Pola pergerakan arus yang sama juga terjadi pada saat pasang tertinggi perbani dengan kecepatan yang lebih kecil, yaitu 0,77 m/s di dekat *sill*.

Hasil simulasi model pada bulan April 1996 menunjukkan adanya air hangat yang masuk dari Samudera Pasifik menuju selat hingga Samudera Hindia dan membentuk *well-developed thermal plume* di selatan *sill* seperti yang terlihat pada hasil simulasi. *Thermal plume front* hanya mencapai hingga 32,1 km dari *sill* di bagian selatan.

Musim Timur (Agustus)

Pada musim ini, sebaran temperatur berkisar 6-36,91°C, jika dibandingkan dengan Musim Peralihan 1, terjadi kenaikan temperaturnya sekitar 4°C. Gangguan pada *isotherm* terlihat lebih besar diantara *sill* dan Pulau Kangean (bagian utara), hal ini menunjukkan fenomena *upwelling* di sekitar daerah tersebut pada bulan Agustus.

Evolusi gelombang internal menjadi soliton pada Musim Timur terekam pada citra ERS 1 pada 02:32 UTC, 27 Agustus 1997 seperti yang terlihat pada Gambar 4.

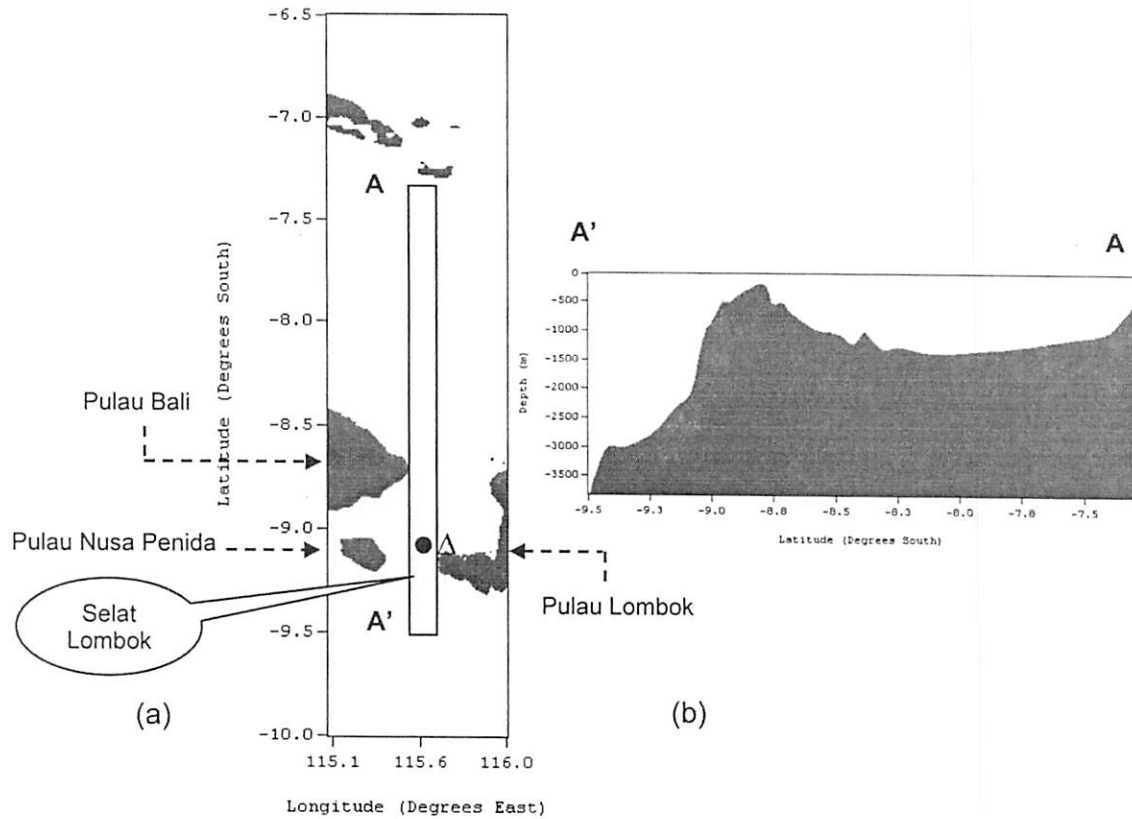
Pada saat pasang tertinggi pumama arus bergerak ke Laut Flores dengan kecepatan maksimum 1,98 m/

s di dekat *sill*. Pada saat pasang tertinggi perbani, arus bergerak ke Laut Flores dengan kecepatan 0,8 m/s. *Thermal plume* lebih terdesak ke bagian *sill* di selatan dengan jarak 29,9 km dari *sill* dibandingkan pada bulan April (32,1 km).

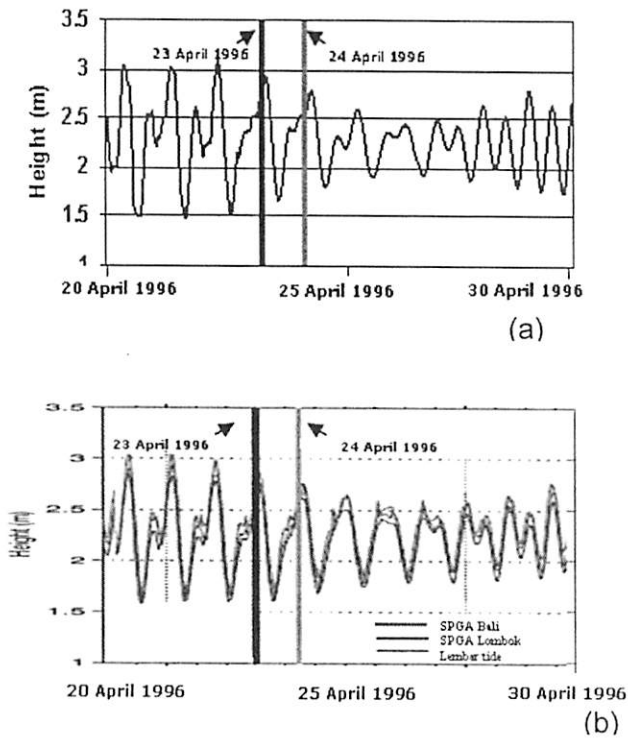
Musim Peralihan 2 (November)

Sebaran temperatur pada musim ini yang diwakili oleh bulan November 1997 berkisar 6-30,45°C, temperaturnya 4-6°C lebih kecil dibanding pada musim-musim sebelumnya. Agitasi *isotherm* pada badan air yang tersimulasikan pada musim ini hampir mirip polanya dengan pola agitasi pada bulan April 1996. Namun kekuatan agitasinya lebih lemah dibanding kekuatan agitasi pada bulan April, terutama di bagian utara antara *sill* dan Pulau Kangean. Sedangkan di bagian selatan dan di sekitar Pulau Kangean agitasinya lebih kuat dibandingkan pada bulan April 1996.

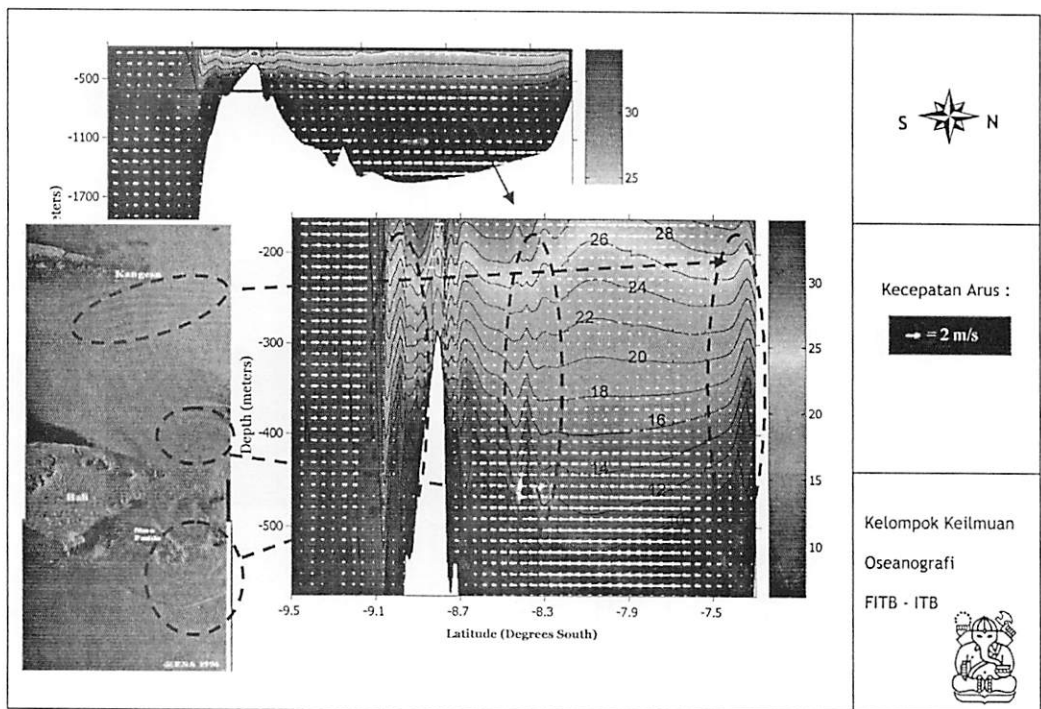
Evolusi gelombang internal menjadi soliton pada Musim Peralihan 2 terekam pada citra ERS 1 pada 02:32 UTC, 5 November 1997 seperti yang terlihat pada Gambar 5. Pada saat pasang tertinggi pumama, arus bergerak ke Laut Flores dengan kecepatan maksimum 1,9 m/s di dekat *sill*. Pola pergerakan arus serupa juga terjadi pada saat pasang tertinggi perbani dengan kecepatan 0,75 m/s di sekitar *sill*. *Thermal plume* yang terbentuk pada Musim Peralihan 2 ini lebih jauh (66,2 km) dibandingkan dengan simulasi sebelumnya (Musim Peralihan 1 dan Musim Timur).



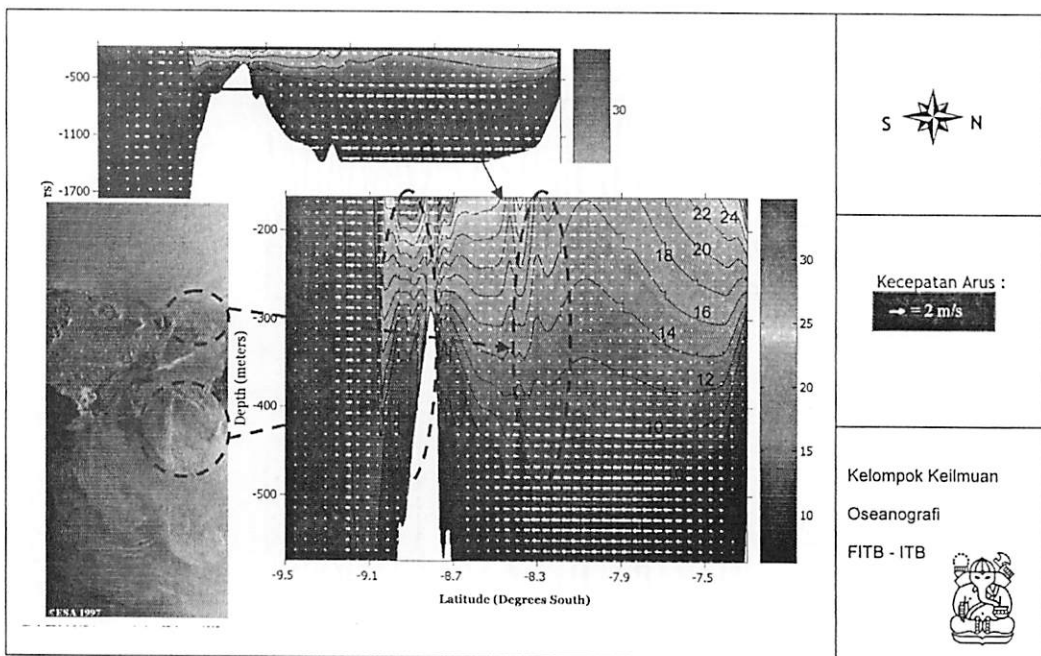
Gambar 1. Domain model di Selat Lombok, St. Lembar (segitiga), titik verifikasi dan referensi pasut (lingkaran hitam) (a), dan profil kedalaman secara vertikal di Selat Lombok (b).



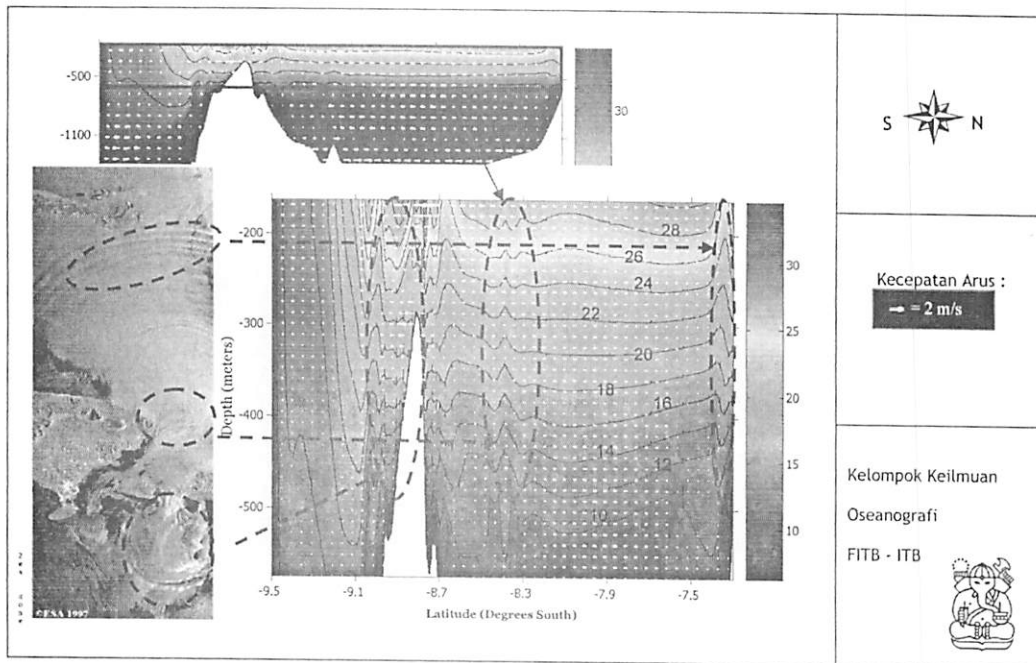
Gambar 2. Verifikasi elevasi di Lembar. Hasil simulasi model (a) dan hasil pengukuran (warna hijau) (b).



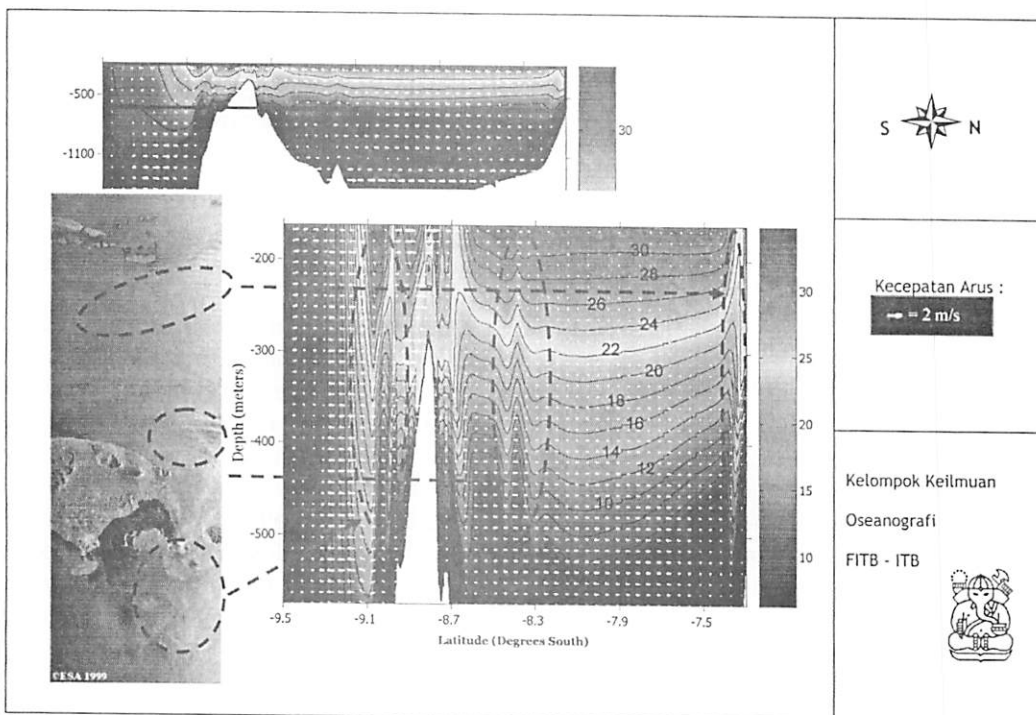
Gambar 3. Evolusi gelombang internal menjadi soliton hasil citra ERS 1 dan hasil simulasi serta pola arus dan distribusi temperatur vertikal baroklinik pada 02:32 UTC, 23 April 1996.



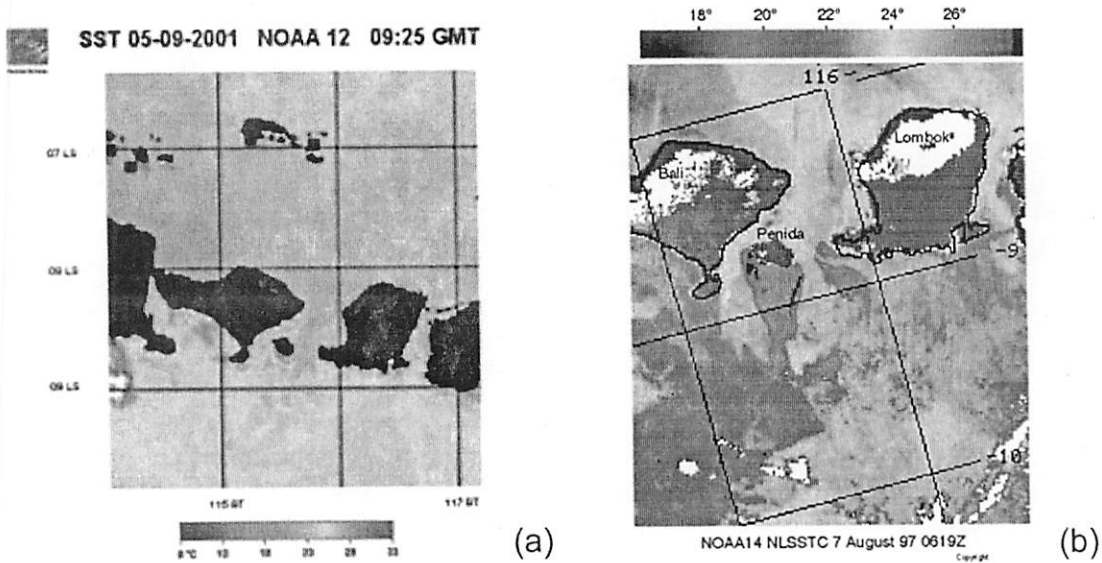
Gambar 4. Evolusi gelombang internal menjadi soliton hasil citra ERS 1 dan hasil simulasi serta pola arus dan distribusi temperatur vertikal baroklinik pada 02:32 UTC, 27 Agustus 1997.



Gambar 5. Evolusi gelombang internal menjadi soliton hasil citra ERS 1 dan hasil simulasi serta pola arus dan distribusi temperatur vertikal baroklinik pada 02:32 UTC, 5 November 1997.



Gambar 6. Evolusi gelombang internal menjadi soliton hasil citra ERS 1 dan hasil simulasi serta pola arus dan distribusi temperatur vertikal baroklinik pada 02:32 UTC, 15 Desember 1999.



Gambar 7. Temperatur yang lebih rendah di permukaan laut yang tertangkap oleh citra satelit di bagian selatan *sill* pada tanggal 9 Mei 2001 (a) dan 7 Agustus 1997 (b) (sumber <http://www.noaa.gov>).

Musim Barat (Desember)

Pada musim ini, sebaran temperatur berkisar 6-36,24°C. Jika dibandingkan dengan musim Timur, kisaran sebaran temperaturnya hampir sama, dimana perbedaannya hanya 0,67°C. Evolusi gelombang internal menjadi soliton pada Musim Barat terekam pada citra ERS 1 pada 02:32 UTC, 15 Desember 1999 seperti yang terlihat pada Gambar 6.

Kecepatan arus maksimum pada musim ini hampir sama dengan kecepatan arus maksimum pada Musim Timur, yaitu 1,98 m/s pada saat pasang tertinggi purnama dan 0,8 m/s pada saat pasang tertinggi perbani. *Thermal plume* yang terbentuk pada Musim Barat sejauh 42,6 km.

Amplitudo gelombang internal dan gelombang soliton, panjang gelombang internal dan gelombang soliton, jumlah soliton, kecepatan propagasi, dan jarak *thermal plume* pada musim peralihan 1, musim timur, musim peralihan 2, dan musim barat dirangkum dalam Tabel 1.

Penjalaran gelombang internal ke Laut Jawa/Laut Flores selalu memiliki bentuk yang lebih teratur dibanding di Selatan seperti yang tampak pada hasil simulasi. Hal ini terjadi dikarenakan adanya pengaruh kecuraman *sill* di selatan.

Fenomena masuknya air hangat dari Samudera Pasifik mengakibatkan suhu permukaan di lapisan

permukaan selalu lebih panas dibandingkan dengan interior laut. Fenomena ini juga terdeteksi oleh ERS SAR seperti pada Gambar 7 (a)-(b). Seperti hasil simulasi model, hasil citra ERS SAR juga memperlihatkan bahwa di sebelah selatan *sill* selalu lebih rendah temperaturnya dibanding temperatur di bagian utara.

Tabel 2 menunjukkan verifikasi hasil simulasi dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Amplitudo gelombang soliton terbesar di bagian selatan *sill* pada Musim Peralihan 1 dan Musim Barat. Sedangkan amplitudo terbesar di bagian utara ditunjukkan pada hasil simulasi Musim Timur. Hal ini disebabkan kedalaman *interface* pada Musim Peralihan (175 m) dan Musim Timur (150 m) cukup dangkal, dimana sesuai dengan analisis yang dilakukan oleh Brandt *et al.* (1996) bahwa semakin dangkal kedalaman *interface*, maka amplitudo dan kekuatan gelombang akan lebih besar. Selain itu densitas pada Musim Timur lebih ringan dibanding pada musim-musim yang lain.

Kecepatan propagasi di bagian selatan selalu lebih kecil dibanding kecepatan propagasi di bagian utara pada setiap musim. Hal ini juga berkesesuaian dengan hasil analisis yang dilakukan oleh Brandt *et al.* (1996), dimana besarnya kecepatan propagasi dipengaruhi oleh amplitudo, stratifikasi dan ketebalan lapisan (*h*). Dari hasil simulasi, fenomena adanya

Tabel 2. Verifikasi amplitudo dan panjang gelombang Internal dan soliton dengan hasil penelitian sebelumnya.

	Jaharuddin Sulaiman (2004)	Susanto, et al., (2005)	Pujiana (2004); Ningsih, et al.,(2004)	Visser (2004)	Mitnik, et al., (2000)	Present Study (Simulated by MITgcm)			
	(2004)	(2004)	(2004); Ningsih, et al.,(2004)	(2004)	(2000)	Musim Peralihan1 (April 1996)	Musim Timur (Agustus 1997)	Musim Peralihan2 (November 1997)	Musim Barat (Desember 1999)
Amplitudo (puncak ke lembah) gelombang Internal (m)		84-150 (S)	75-100 (S) 30-50 (N)			285 (S) 78 (N)	64 (S) 300 (N)	250 (S) 50-60 (N)	90 (S) 50 (N)
Panjang gelombang Internal (*), (km)			50-75			14,6 (S) 33,4 (N)	14,6 (S) 10,9 (N)	15,8 (S) 75,4 (N)	12,4 (S) 90 (N)
Amplitudo (puncak ke lembah) gelombang Soliton (m)	39,45	25				30-88 (S) 25-81 (N)	20-80 (S) 60-80 (N)	80 (S) 64 (N)	80 (S) 63 (N)
Panjang gelombang Soliton (*), (km)		1,4-2,5 1-3 2-5 2-7,5		1,863	Max 6.5 (Nov) 0,7-2 (S) (Jan) 3,5-5 (N) 2-6.5 (N) (May)	0,9-7,1(S) 0,9-10,8(N)	0,3-11,6(S) 0,9-14,6(N)	1,64-7,6(S) 2-10,4(N)	3,6-5,5(S) 6,3-8,7(N)
Jumlah Soliton dalam 1 Paket		7-15 (S-N) 23-25 (April)			12 (N) (Nov) 15 (N) (Dec) 14 (N) (May)	7-10 (S) 9 (N ₁) 10 (N ₂) 6 (N ₃)	6 (S) 10 (N ₁) 6 (N ₂) 8 (N ₃)	10 (S) 10 (N ₁) 12 (N ₂) 5 (N ₃)	10 (S) 10 (N ₁) 12 (N ₂) 6 (N ₃)
Kecepatan Propagasi Soliton (m/s)		1,96-1,97		1,62	1,8-1,9 (Aug) 2,5 (Dec) 2,6 (Jan) 1,9 (May)	0,27-1,44(S) 0,77-2,67 (N)	0,21-0,69(S) 2,46 (N)	0,3-0,98(S) 0,71-2,58 (N)	0,98 (S) 0,67-2,67(N)

Catatan: N : bagian utara sill, S : bagian selatan sill, N₁ : paket pertama penjalaran soliton ke utara, N₂ : paket kedua penjalaran soliton ke utara, dan N₃ : paket ketiga penjalaran soliton ke utara.

thermal plume di bagian selatan *sill* juga teridentifikasi oleh pengolahan data pengukuran (Mitnik et al., 2000).

Berdasarkan penelitian sebelumnya (Mitnik et al., 2000; Sprintall et al., 2003; Syamsudin & Kaneko, 2004), diketahui bahwa penyebab terjadinya *well developed thermal plume front* di selatan *sill* dapat disebabkan karena adanya *Indian Ocean Kelvin waves* (IOKW's) sepanjang musim transisi yang mensuplai air dingin dari Samudera Hindia menuju Selat Lombok.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *thermal plume* yang paling terdesak terjadi pada bulan Agustus 1997, hal ini akibat gelombang Kelvin yang terbangkitkan pada bulan April 1997 di ekuator, kemudian menjar ke Selat Lombok sampai bulan Juni 1997 dengan energi yang cukup kuat sampai bulan Agustus 1997, sehingga temperatur terdesak hingga 29,9 km dari *sill*. Berdasarkan Syamsudin & Kaneko (2004), energi *Kelvin Wave* yang masuk melalui Selat Lombok ± 65 %. Hal ini dapat memperkuat secara fisis hasil simulasi model yang memperlihatkan lebih terdesaknya *thermal plume* di bagian selatan *sill*. Pada bulan November

1997 kekuatan gelombang Kelvin di Selat Lombok mulai melemah, sehingga *thermal plume* berjarak 66,2 km dari *sill* di bagian selatan. Pada bulan yang sama pada tahun 1999, gelombang Kelvin terbangkitkan kembali di ekuator, dan berdasarkan data (Syamsudin & Kaneko, 2004) gelombang Kelvin sampai ke Selat Lombok pada bulan Desember 1999 dengan kekuatan yang cukup kuat, namun tidak sekuat ketika tiba di Selat Lombok pada bulan Juni 1999. Oleh karena itu berdasarkan hasil simulasi, *thermal plume* terdesak hingga 42,6 km dari *sill* pada bulan Desember 1999. Sementara itu, pada bulan April 1999 terlihat *thermal plume* lebih kuat terdesak dengan jarak 32,1 km dari *sill* dibanding pada bulan Desember 1999. Berdasarkan hasil simulasi diduga kekuatan gelombang Kelvin bukan satu-satunya faktor yang menyebabkannya, namun pada Musim Peralihan 1 ini terdeteksi adanya SJC (*South Java Current*) yang mendorong massa air dari Samudera Hindia ke Samudera Pasifik, sehingga *thermal plume* lebih terdesak dibandingkan pada Musim Barat.

Hasil penelitian ini memperkuat Sprintall *et al.*, (2003) yang menyatakan bahwa variabilitas temperatur, salinitas, dan terjadinya *well developed thermal plume* di Selat Lombok disebabkan beberapa faktor, yaitu (1) Adanya *coastal Kelvin Wave* yang membawa massa air dingin bersama-sama SJC dari Samudera Hindia seperti yang terjadi pada Musim Barat yang diwakili oleh bulan Desember, sehingga menyebabkan *interface* lebih dalam dibandingkan dengan musim lainnya, (2) Pengaruh angin monsun, seperti yang terjadi pada Musim Timur yang diwakili oleh bulan Agustus 1997, dimana angin berhembus dari timur dan menyebabkan *upwelling* di selatan Jawa, Bali, dan Lombok dan mengangkat *interface*, sehingga *interface* lebih dangkal dibandingkan dengan musim lainnya, (3) Fenomena ENSO, El Niño, La Niña yang memberikan dampak terhadap dangkal/dalamnya suatu *interface* termoklin, seperti yang terjadi pada bulan Agustus 1997, selain adanya pengaruh angin monsun, pada tahun tersebut terjadi fenomena El Niño, dimana kolom air hangat berpindah ke Pasifik bagian timur, dan hal ini menyebabkan lebih dangkalnya *interface* pada bulan Agustus 1997.

Kesimpulan

Simulasi model telah menunjukkan hasil yang hampir sama dengan citra satelit *ERS SAR* yang mendeteksi adanya fenomena gelombang internal, dan gelombang soliton di dekat Pulau Kangean di utara *sill*, dan di selatan *sill*. Gelombang soliton yang

menjalar ke arah utara dan ke arah selatan tersebut merupakan disintegrasikan gelombang internal yang terbangkitkan pada masing-masing sisi *sill*. *Interfacial depression* di sisi utara mendekati *sill*, lalu terdisintegrasikan menjadi *train solitary wave* di selatan, sedangkan *interfacial depression* di sisi selatan mendekati *sill*, lalu terdisintegrasikan menjadi *train solitary wave* di utara yang akan menjalar menjauhi *sill*.

Ucapan Terima Kasih

Tidak lupa penulis ucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada ketiga pembimbing dalam penelitian ini, Dr. Eng. Nining Sari Ningsih, Prof. Safwan Hadi, Ph.D, dan Irsan S. Brodjonegoro, Ph.D. Selain itu penulis juga ucapkan terima kasih kepada kedua reviewer dari pihak Jurnal Ilmu Kelautan UNDIP yang telah mengkoreksi artikel ini sehingga layak untuk dipublikasikan.

Daftar Pustaka

- Adcroft, A., D. Marshall, 1988. How Slippery Are Piecewise-Constant Coastlines in Numerical Ocean Models?. *Tellus*, 50(1) : 95-108.
- Adcroft, A., C. Hill, J. Marshall, 1997. Representation of Topography Byshaved Cells In A Height Coordinate Ocean Model. *Mon. Wea. Rev.* 125: 2293-2315.
- Adcroft, A., J.M. Campin, 2004. Re-Scaled Height Coordinates For Accurate Representation of Free-Surface Ows in Ocean Circulation Models. *Ocean Modelling*, 7: 269-284.
- Adcroft, A., J.M. Campin, C. Hill, J. Marshall, 2004. Implementation of an atmosphere-ocean general circulation model on the expanded spherical cube, *Mon. Wea. Rev.*, 132: 2845-2863.
- Arvelyna, Y., M. Oshima, 2006. Multi Satellite Data Observation for Internal Wave Observation and Its Effect to Plankton Distribution in the Lombok Strait and Adjacent Areas, ISRS 2006 PORSEC, Pusan, Korea, November 2-4, 2006.
- Brandt, P., W. Alpers, J. O. Backhaus, 1996. Study of the Generation and Propagation of Internal Waves in the Strait of Gibraltar Using a Numerical Model and Synthetic Aperture Radar Images of the European ERS 1 Satellite. *J. Geophys. Res.*, 101: 14237-14252.
- Gerkema, T., and J. T. F. Zimmerman, 1995. Generation of Nonlinear Internal Tides and Solitary Waves, *J. Geophys. Res.*, 25: 677-687.

- Hill, C., J. Marshall, 1995. Application of a Parallel Navier-Stokes Model to Ocean Circulation in Parallel Computational Fluid Dynamics In Proceedings of Parallel Computational Fluid Dynamics: Implementations and Results Using Parallel Computer, Elsevier Science B.V.: New York. 545-552 pp.
- Hill, C., Marshall, J., 1998. Efficient ocean modeling using non-hydrostatic algorithms, *J. Marine Systems* .18 :115-134.
- <http://iridl.ldeo.columbia.edu>. 22 Maret 2007.
- <http://www.noaa.gov>. 19 Mei 2007.
- Jaharuddin, 2004. Solitary Waves in Lombok Strait and Morning Glory Phenomena Numeric Simulation, Ph. D thesis, Institut Teknologi Bandung.
- Kunze, E., J. M. Toole, 1997. Tidally Driven Vorticity, Diurnal Shear, and Turbulence A top Fieberling Seamount. *J. Phys. Oceanogr.* 27 : 2663.
- Ledwell, J. R., A. J. Watson, C. S Law, 1998. Mixing of a Tracer in the Pycnocline. *J. Geophys. Res.* 10321: 499.
- Marotzke, J., R. Giering, K. Zhang, D. Stammer, C. Hill, T. Lee, 1999. Construction of The Adjoint Mit Ocean General Circulation Model And Application To Atlantic Heat Transport Variability, *J. Geophys. Res.*, 104 (C12) : 29.529-29.547.
- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, C. Heisey, 1997. A Nite-Volume, Incompressible Navier Stokes Model For Studies of The Ocean on Parallel Computers, *J. Geophys. Res.*, 102 (C3): 5753-5766,
- Marshall, J., C. Hill, 1998. Efficient ocean modeling using non-hydrostatic algorithms. *Journal of Marine Systems*, 18 :115-134.
- Marshall, J., A. Adcroft, J. M. Campin, C. Hill, A. White, 2004. Atmosphere-Ocean Modeling Exploiting Fluid Isomorphisms. *Mon. Wea. Rev.*, 132 : 2882-2894,
- Massel, S., R., 1999. Fluid Mechanics for Marine Ecologies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Mitnik, L., W. Alpers, and L. Hock, 2000. Thermal Plume and Internal Waves Generated in The Lombok Strait Studied by ERS SAR", *In ERS-Envisat Symposium: Looking down to Earth in the New Millennium*, 16-20 October 2000. Gothenburg, Sweden. SP-461. European Space Agency, Publication Division, Noordwijk, The Netherlands, 1-9, 2000.
- Munk, W., Wunsch C., 1998. Abyssal recipes II: Energetics of Tidal and Wind Mixing, *Deep Sea Res., Part I*. 45: 1977-2010.
- Ningsih, N.S., S. Hadi, K. Pujiana, 2004. A Numerical Study of the Generation of Internal Wave in the Lombok Strait, Paper presented at INSTANT (International Nusantara Stratification and Transport) Workshop: "Oceanography of Indonesian Seas", Bali, Indonesia.
- Osborne, A.R., T.L.Burch, 1990. Internal Solitons in the Andaman Sea, *Science* 208 : 451-460.
- Polzin, K. L., Toole, J. M. Ledwell J. R., and R. W. Schmitt, 1997. Spatial Variability of Turbulent Mixing in the Abyssal Ocean. *Science* 76 : 93
- Pujiana, K., 2004. Dinamika Gelombang Internal di Selat Lombok. Tesis, Program Studi Oseanografi, Sains Atmosfer dan Seismologi, Institut Teknologi Bandung.
- Sprintall, J., J. T. Potemra, S. L. Hautala, N. A. Bray, W. Pandoe, 2003. Temperature And Salinity Variability In The Exit Passages of The Indonesian Throughflow. *Deep-Sea Research II* 50(2003): 2183-2204.
- Sulaiman, A., 2004. Study of Internal Solitary Wave by Using Satellite Imagery and Mathematical Model. Proceedings of the Thirteenth Workshop of OMISAR (WOM-13) on the Application and Networking of Satellite Data, Bali, Indonesia, 5-9 October 2004.
- Susanto, R. D., 2005. Satellite Synthetic Aperture Radar Observation of Ocean Internal Waves in the Straits, *Journal of Geophysical Research*-submitted.
- Susanto, R. D., L. Mitnik, Q. Zheng, 2005. Ocean Internal Waves Observed in the Lombok Strait, *J. Oceanography* 18 (4): 80-87.
- Syamsudin, F., and A. Kaneko. 2004. Numerical and Observational Estimates of Indian Ocean Kelvin Wave Intrusion into Lombok Strait. *Geophysical Research Letters.*, 31: 1-4
- Venayagamoorthy, S.K., O. B. Fringer, 2006. Numerical Simulations of the Interaction of Internal Waves with a Shelf Break. *Physics of Fluids* 18:4305-4320.

Visser, W. P., 2004. On the Generation of Internal Waves in Lombok Strait through Kelvin-Helmholtz Instability. M. Sc. Thesis, University of Twente Netherland.

Wadzuk, B. M., 2004. Hydrostatic and Non-hydrostatic Internal Wave Models, Ph. D thesis, The University of Texas, Austin.