

Kajian Daerah Rawan Bencana Gelombang Badai Pasang (Storm Tide) di Kawasan Pesisir Selatan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat

Nining Sari Ningsih^{1*}, Safwan Hadi¹, Agung B. Harto², M. D. Utami¹, dan Amanda P. Rudiawan²

¹Kelompok Keahlian Oseanografi, FITB, Institut Teknologi Bandung
Gedung Lab Tek XI, Lt. 1, ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.
Telp.: (022)-2505253, Fax: (022)-2534139, E-mail: nining@fitb.itb.ac.id

²Program Magister Teknik Geodesi dan Geomatika, FITB – ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung

Abstrak

Gelombang badai pasang (storm tide) yang dibangkitkan pasang surut dan siklon tropis di Samudera Hindia sering menerjang kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat (NTB). Pada penelitian ini, model hidrodinamika dua dimensi (2D) horisontal Mike 21 digunakan untuk mensimulasikan tinggi gelombang, run-up, dan genangan di sepanjang kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan NTB yang ditimbulkan oleh penjalaran gelombang pasang surut dan badai yang dibangkitkan oleh badai Jacob (2–12 Maret 2007) dan George (3–9 Maret 2007) di perairan pantai barat laut Australia. Penjalaran gelombang badai pasang disimulasikan dengan menggunakan data elevasi pasang surut di daerah batas terbuka model, angin, tekanan udara, dan lintasan badai. Data elevasi pasang surut diperoleh dari TMD (tide model driver), sedangkan data angin dan tekanan udara diperoleh dari NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Data sea level anomaly (SLA) mingguan dari TOPEX Poseidon digunakan untuk memverifikasi tinggi gelombang badai (surge) yang dihasilkan model. Gelombang badai (surge) tertinggi di kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan NTB, masing-masing terjadi di Nusa Kambangan (Jawa; 19,0 cm), Tuban (Bali; 14,7 cm), Teluk Gumbang (Lombok; 12,2 cm), dan Tanjung Labulawah (Sumbawa; 12,5 cm). Jarak genangan maksimum (R_{max}) gelombang badai pasang serta tinggi run-up yang menyertainya (H) terjadi di Teluk Penanjung (Jawa; $R_{max} = 835,2$ m, $H = 0,73$ m), Tuban (Bali; $R_{max} = 623,5$ m, $H = 1,02$ m), Tanjung Ringgit (Lombok; $R_{max} = 1112,3$ m, $H = 1,03$ m), dan Teluk Cempi (Sumbawa; $R_{max} = 4136,5$ m, $H = 1,10$ m).

Kata kunci : gelombang badai, gelombang badai pasang, genangan, run-up, model hidrodinamika.

Abstract

Storm surges generated by tropical cyclone in the Indian Ocean have often attacked southern coasts of Java, Bali, and Nusa Tenggara Barat (NTB). In this study, A two-dimensional (2D) hydrodynamic model of Mike 21 has been applied to simulate wave height, run-up, and inundation along the southern coasts of Java, Bali, and NTB, generated by tides and the Cyclone Jacob during 2–12 March 2007 and by the Cyclone George during 3–9 March 2007 in northwestern coastal waters of Australia. The storm tide event was simulated by imposing tidal elevations at the open boundaries, winds, air pressure, and storm tracks. Tidal elevation data were derived from TMD (tide model driver), while wind and air pressure data were obtained from NCEP (National Centers for Environmental Prediction). The weekly TOPEX Poseidon Sea Level Anomaly (SLA) was used to validate the model results of surge height. Highest surges along the southern coasts of Java, Bali, and NTB existed at Nusa Kambangan (Java; 19.0 cm), Tuban (Bali; 14.7 cm), Teluk Gumbang (Lombok; 12.2 cm), and Tanjung Labulawah (Sumbawa; 12.5 cm). Maximum distances of storm tide flooding (R_{max}) and their associated run-up heights (H) occurred at Teluk Penanjung (Java; $R_{max} = 835.2$ m, $H = 0.73$ m), Tuban (Bali; $R_{max} = 623.5$ m, $H = 1.02$ m), Tanjung Ringgit (Lombok; $R_{max} = 1112.3$ m, $H = 1.03$ m), and Teluk Cempi (Sumbawa; $R_{max} = 4136.5$ m, $H = 1.10$ m).

***Key words :** storm surges, storm tide, inundation, run-up, hydrodynamic model.

Pendahuluan

Kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat (NTB) merupakan daerah yang potensial dalam pengembangan kawasan wisata bahari dan industri perikanan, tetapi daerah tersebut rentan diterjang bencana laut seperti yang sering terjadi akhir-akhir ini berupa gelombang badai pasang (*storm tide*) yang merupakan superposisi antara gelombang yang disebabkan pasang surut astronomis dan badai. Di kawasan pantai, gelombang badai pasang dapat menyebabkan naiknya (*run-up*) air laut ke darat dan menyebabkan banjir (*flooding*) yang menggenangi (inundasi) daratan tersebut. Banjir yang disebabkan meluapnya air laut ini biasanya disebut *rob* yang dapat menyebabkan kelumpuhan perekonomian warga, kerusakan infrastruktur, dan ekosistem, sehingga perlu diwaspadai. Meluapnya air laut di kawasan pesisir dapat disebabkan oleh gabungan beberapa faktor dominan, yaitu fenomena pasang surut purnama, posisi bulan yang berada pada titik terdekat dengan bumi (*perigee*), *swell* yang berasal dari badai, penurunan permukaan tanah, dan naiknya permukaan laut akibat efek pemanasan global

Sebagai contoh, gelombang dengan tinggi 2-6 m dan kecepatan angin 13,61 m/dt telah menerjang 11 provinsi (NAD, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Bengkulu, Lampung, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta, Jawa Timur, dan Bali) pada tanggal 18 Mei 2007 (Kompas, 19 Mei 2007). Terjangan gelombang di sepanjang garis pantai daerah tersebut mengakibatkan pula lumpuhnya aktivitas kepariwisataan, rusaknya perahu nelayan, dan ribuan warga mengungsi ke kawasan yang aman. Di pantai selatan Jawa, daerah yang paling rentan diterjang gelombang tinggi tersebut adalah Pelabuhan Ratu, pantai Garut, Cianjur, pantai Pangandaran, Bantul (Yogyakarta), serta pantai selatan Kebumen dan Cilacap. Dalam hal ini pantai selatan Kebumen dan Cilacap yang paling menderita diterjang gelombang besar tersebut (Kompas, 19 Mei 2007). Faktor-faktor penggerak yang diduga berkontribusi memicu terjadinya gelombang besar tersebut adalah terjadinya badai tropis dengan kecepatan angin > 35 m/s di Tanjung Harapan (Afrika Selatan) pada tanggal 9 Mei 2007, pasang surut pada kondisi ekstrim (purnama dan *perigee*), dan gelombang Kelvin.

180

Keberadaan Gelombang Kelvin yang menjalar sepanjang pantai selatan Sumatera, Jawa, Bali, dan Lombok telah dilaporkan dan dibahas oleh beberapa peneliti, baik berdasarkan pengamatan (Arief & Murray, 1996; Meyers, 1996; Michida & Yoritaka, 1996; Sprintall et al. 2000; Wijffels & Meyers, 2004)

maupun berdasarkan model (Yamagata et al., 1996), tetapi riset tentang gelombang badai pasang sepanjang pantai selatan Jawa-NTB masih jarang atau bahkan belum ada, khususnya studi tentang zonasi daerah yang rentan terhadap dampak gelombang badai pasang. Selain itu, penelitian yang membahas tentang faktor-faktor utama yang mungkin berperan membangkitkan gelombang tinggi dan rob (*flooding*) di sepanjang pantai Jawa-NTB masih sangat terbatas, khususnya studi tentang rob yang disebabkan pasang surut dan *storm surge* yang dibangkitkan siklon tropis. Oleh sebab itu, kami termotivasi untuk melakukan studi tersebut seperti yang akan disampaikan pada artikel ini.

Tulisan ini membahas penentuan daerah rawan bencana gelombang badai pasang (*storm tide*) yang dibangkitkan pasang surut dan badai untuk studi kasus badai siklon Jacob (2-12 Maret 2007) dan George (3-9 Maret 2007) yang terjadi di perairan barat laut Australia dengan menggunakan model hidrodinamika dua dimensi (2D) horisontal (Mike 21) berdasarkan metoda *finite volume* yang dikembangkan oleh DHI Water & Environment (2005).

Materi dan Metode

Storm surge (gelombang badai) adalah gelombang dengan panjang gelombang sampai beberapa kilometer yang dibangkitkan oleh badai (*storm*) dan penurunan tekanan atmosfer yang disebabkan suatu kejadian cuaca yang ekstrim (Garrison, 2006). Tekanan udara di pusat badai sangat rendah sehingga dapat menaikkan permukaan laut. Naiknya permukaan air laut (akibat melintasnya daerah tekanan atmosfer yang rendah) akan membangkitkan gelombang yang menjalar ke luar daerah pembangkitnya (*swell*), dan ketika sampai di perairan pantai tinggi gelombangnya akan bertambah karena efek pendangkalan.

Jika gelombang badai merambat ke perairan dangkal, kecepatannya berkurang, panjang gelombangnya memendek, serta tingginya bertambah dan jika terjadi bersamaan dengan fasa gelombang pasang surut pada kondisi air pasang tinggi (*high tide*) dapat menambah tinggi muka laut. Superposisi kedua jenis gelombang tersebut disebut *storm tide* (gelombang badai pasang) yang dapat mengakibatkan terjadinya gelombang ekstrim dengan tinggi dapat mencapai $\pm 2 - 5$ m atau lebih. Kenaikan air laut akibat gelombang ekstrim dapat mengakibatkan banjir *rob* di daerah pantai jika tinggi muka laut melebihi tinggi daratan dan banjir tersebut dapat menghancurkan kehidupan sosial dan ekonomi penduduk. Gelombang badai pasang juga sangat berbahaya bagi kapal-kapal yang sedang berlabuh maupun yang sedang berlayar di

dekat pantai. Oleh sebab itu, informasi tinggi gelombang, *run-up*, dan daerah genangan yang dibangkitkan gelombang badai pasang penting untuk dilakukan. Persyaratan utama terbentuknya badai tropis adalah kelembaban udara yang tinggi, sehingga daerah yang memenuhi syarat tersebut adalah daerah perairan (lautan) di zona tropis dan subtropis yang temperaturnya 26,5 °C. Gambar 1 memperlihatkan wilayah yang berpotensi dilanda badai tropis. Berdasarkan Gambar 1., diketahui bahwa wilayah perairan yang sangat berpotensi dilanda badai tropis dan letaknya dekat dengan perairan Indonesia adalah wilayah nomor 3, 4, dan 6. Meskipun Indonesia bukan daerah lintasan badai tropis, di beberapa wilayah Indonesia yang dekat dengan jalur badai tropis terlihat adanya kenaikan jumlah curah hujan diatas normal dan kenaikan tinggi gelombang laut yang disebabkan membesarnya kecepatan angin (Tjasyono & Harijono, 2008). Dengan kata lain, Indonesia hanya akan terkena pengaruh tidak langsung, yaitu berupa angin kencang, gelombang badai (*storm surge*), dan hujan lebat pada daerah-daerah yang dekat dengan tempat tumbuhnya badai.

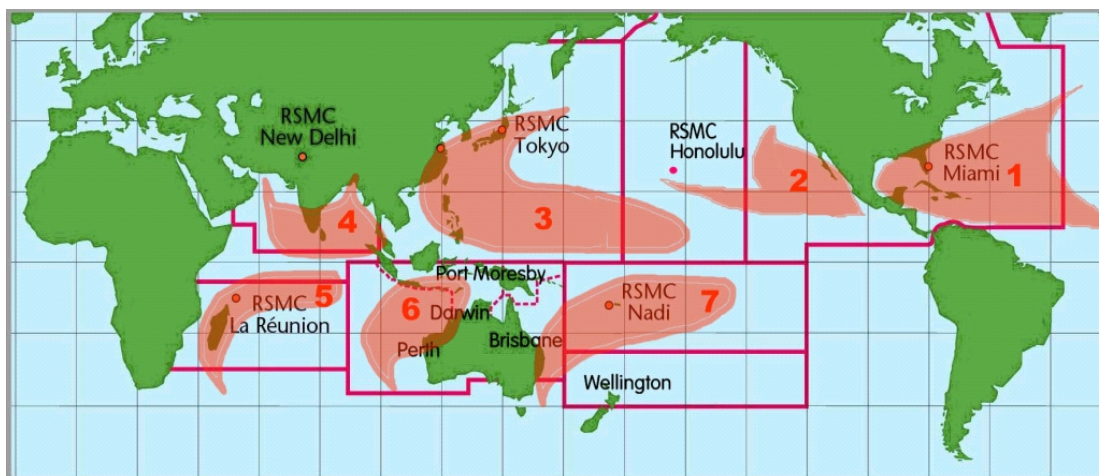
Pada saat musim kemarau, badai tropis tumbuh di sekitar perairan sebelah utara Papua Nugini dan bergerak ke arah Filipina, Korea, atau Jepang. Badai jenis ini antara lain adalah badai tropis Cimaron (6 Oktober–6 November 2006), badai tropis Durian (26 November–6 Desember 2006), badai tropis Utor (6–14 Desember 2006), dan badai tropis Hagibis (21-26 November 2007). Biasanya daerah yang terkena pengaruh badai tersebut adalah Sulawesi Utara, Laut China Selatan, dan Papua Nugini. Pada saat musim hujan, badai tropis tumbuh di sekitar perairan Laut Timor atau Teluk Carpentaria dan bergerak ke arah barat atau barat daya. Contoh dari badai yang terjadi pada musim hujan adalah badai tropis Nelson (6–7

Februari 2007), badai tropis George (3–9 Maret 2007), maupun badai Jacob (7–12 Maret 2007). Badai-badai tersebut mempengaruhi kondisi cuaca di wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Jawa, Bali, dan Sumatera Selatan. Studi karakteristik badai tropis (a.l., frekuensi kejadian dan intensitas) berdasarkan data selama 39 tahun (1969–2007) di Samudera Hindia bagian selatan (termasuk badai-badai yang dekat dengan perairan selatan Jawa–NTB) dapat dilihat di Anugrah *et al.* (2010).

Persamaan pembangun

Dalam penelitian ini, kejadian gelombang badai pasang yang disebabkan pasang surut astronomis dan gelombang badai yang dibangkitkan oleh siklon Jacob dan George pada Maret 2007 disimulasikan dan dihitung dengan menggunakan model hidrodinamika 2D berdasarkan metoda *finite volume* dan *unstructured grid* (versi 2D dari software Mike 21). Model yang digunakan memiliki fasilitas pemakaian *flexible-mesh* yang memungkinkan ukuran grid dengan resolusi tinggi (ukuran grid yang lebih kecil) di daerah yang menjadi fokus (kajian) utama dan ukuran grid yang lebih besar di daerah lainnya, sehingga jumlah grid lebih ekonomis dibandingkan penggunaan *uniform grid*. Selain itu, model ini memiliki kemampuan untuk menghitung besarnya *run-up* dan *inundation* jika *storm tide* menerjang kawasan pesisir dan dapat digunakan untuk mensimulasikan bentuk geometri pantai yang kompleks.

Persamaan hidrodinamika yang digunakan dalam memodelkan *storm tide* pada penelitian ini adalah persamaan perairan dangkal 2D horisontal yang terdiri dari persamaan kontinuitas dan momentum (DHI Water & Environment, 2005), yaitu:



Gambar 1. Wilayah yang berpotensi dilanda badai tropis
(Sumber: http://images.google.co.id/images/sto_rm_area/)

□ Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0$$

□ Persamaan momentum dalam arah-x

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy})$$

□ Persamaan momentum dalam arah-y

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy})$$

dengan: $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$ dan $h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$

T	: waktu (dt)
η	: elevasi muka air (m)
d	: kedalaman perairan (m)
h	: Kedalaman total, yaitu $\eta+d$ (m)
x, y	: koordinat kartesian arah timur-barat dan utara-selatan (m)
\bar{u}, \bar{v}	: komponen kecepatan yang dirata-ratakan terhadap kedalaman pada arah x, y (m/dt)
g	: gravitasi (m/dt ²)
F	: parameter Coriolis
ρ_0	: densitas referensi (kg/m ³)
P_a	: tekanan atmosfer (Pa)
T_{xx}, T_{xy}, T_{yy}	: viskositas eddy horisontal (m ² /dt ²)
τ_{sx} dan τ_{sy}	: stress angin (N/m ²)
τ_{bx} dan τ_{by}	: stress gesekan dasar (N/m ²)

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

Perumusan viskositas eddy horisontal dinyatakan dengan:

dan $A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ dimana A adalah koefisien viskositas eddy, c_s adalah konstanta Smagorinsky, l adalah panjang karakteristik, dan S_{ij} adalah laju deformasi. Stress angin dinyatakan dengan formulasi empirik berikut ini:

$$\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho_a c_d |u_w| \vec{u}_w, \quad \text{dimana } \rho_a \text{ adalah}$$

densitas udara, c_d adalah koefisien drag angin, dan

$$\vec{u}_w = (u_w, v_w)$$

adalah kecepatan angin di permukaan laut. Sedangkan, stress gesekan dasar didefinisikan dengan

$$\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho_0 c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b|, \quad \text{dimana}$$

$$\vec{u}_b = (u_{bx}, v_{by})$$

adalah kecepatan arus yang dirata-ratakan terhadap kedalaman dan c_f adalah koefisien drag.

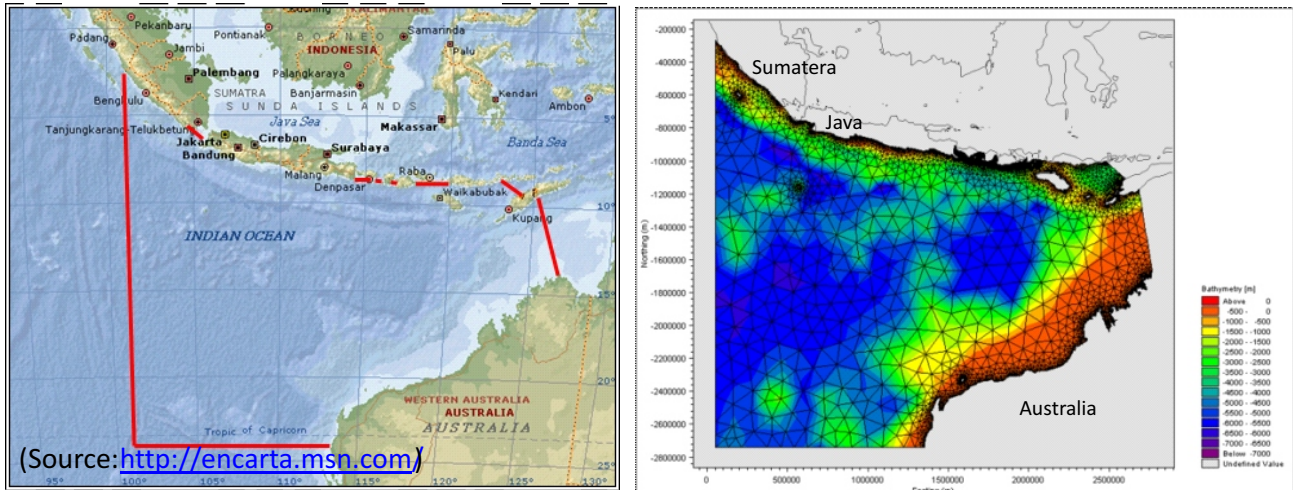
Dalam hal ini c_f dinyatakan dengan

$$c_f = g (Mh^{1/6})^{-2}$$

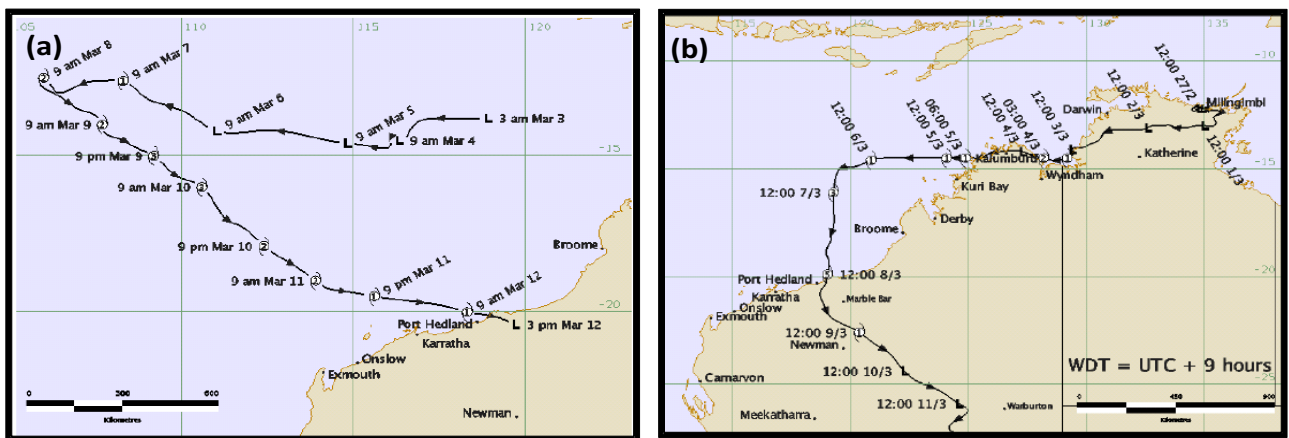
dan M merupakan bilangan Manning.

Aplikasi model

Daerah model yang meliputi perairan pantai selatan Jawa, Bali, NTB, dan Samudera Hindia bagian timur laut (2° 24' 16,5" - 24° 42' 33,8" LS dan 100° 33' 44,7" - 125° 38' 15,7" BT) disajikan pada Gambar 2. Gaya pembangkit yang digunakan dalam simulasi gelombang badai pasang ini adalah pasang surut pada daerah batas terbuka model, angin, tekanan udara, serta siklon Jacob 2-12 Maret 2007 (Gambar 3a) dengan kecepatan angin berkisar 10,3-36 m/dt dan siklon George 3-9 Maret 2007 (Gambar 3b) dengan kecepatan angin 10,3-56,6 m/dt. Data pasang surut diperoleh dari model pasut global TMD (the tide model driver) dengan resolusi 1/4° x 1/4° berdasarkan 8 komponen pasang surut (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, dan Q1) yang dikembangkan oleh Padman & Erofeeva (2005), sedangkan data angin dan tekanan udara dengan interval 6 (enam) jam-an dan resolusi 2,5° x 2,5° diperoleh dari NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Selanjutnya, kemampuan model untuk menghitung fenomena naiknya air laut ke darat (*a wetting and drying - WAD capabilities*) digunakan untuk mensimulasikan fenomena *run-up* dan besarnya genangan (*inundation*) dari *storm tide* tersebut.



Gambar 2. Domain komputasi, batimetri (dalam m), dan grid daerah model.



Gambar 3. Lintasan badai: (a). siklon Jacob 2-12 Maret 2007 dan (b). siklon George 3 - 9 Maret 2007.

(Source: <http://www.bom.gov.au/announcements/sevwx/wa>).

Batimetri daerah model diperoleh dari data GEBCO (IOC, IHO & BODC, 2003) dengan resolusi 1 menit. Topografi yang digunakan berasal dari data SRTM (the Shuttle Radar Topographic Mission, SRT 2007) dengan resolusi 30 m. Pendekatan Manning dipakai dalam parameterisasi gesekan dasar, dengan menggunakan konstanta Manning $0,03125 \text{ m}^{-1/3} \text{ dt}$ (DHI Water & Environment, 2005). Sedangkan untuk suku diffusi horisontal digunakan tipe Smagorinsky dengan nilai konstanta 0,28.

Simulasi model dilakukan selama 22 hari (28 Februari–21 Maret 2007) yang mencakup waktu kejadian kedua siklon tersebut. Ukuran grid model yang digunakan bervariasi dari 50 km di daerah laut dalam sampai dengan $\pm 150 \text{ m}$ di daerah pantai. Pada artikel ini, studi difokuskan di pantai selatan Jawa, Bali, dan NTB dengan resolusi grid yang lebih tinggi, yaitu $\pm 50 \text{ m}$ agar proses-proses inundasi dapat disimulasikan.

Hasil dan Pembahasan

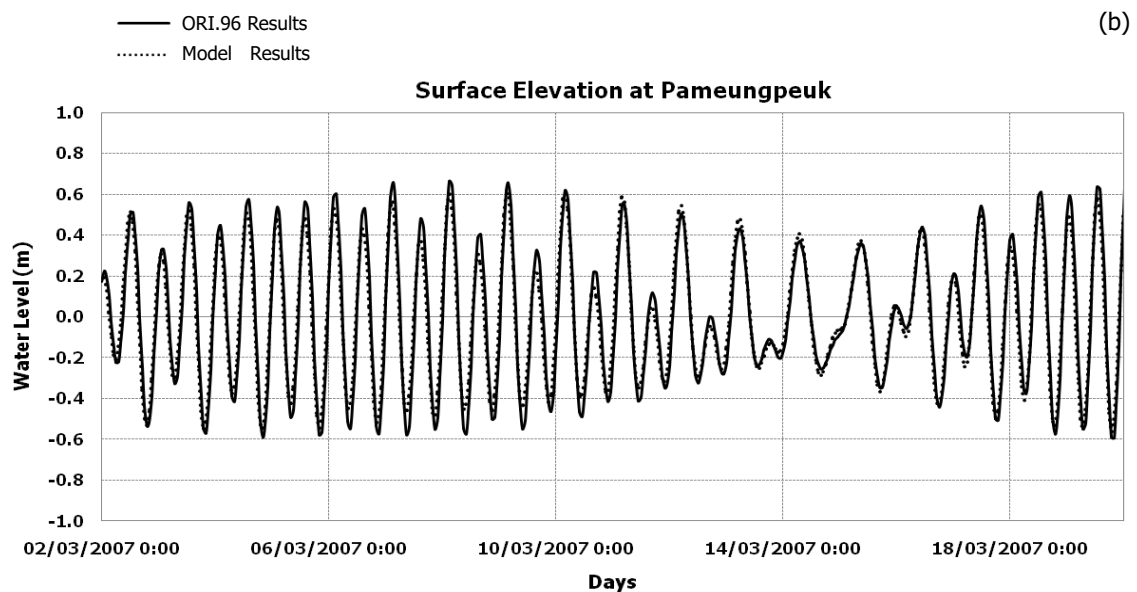
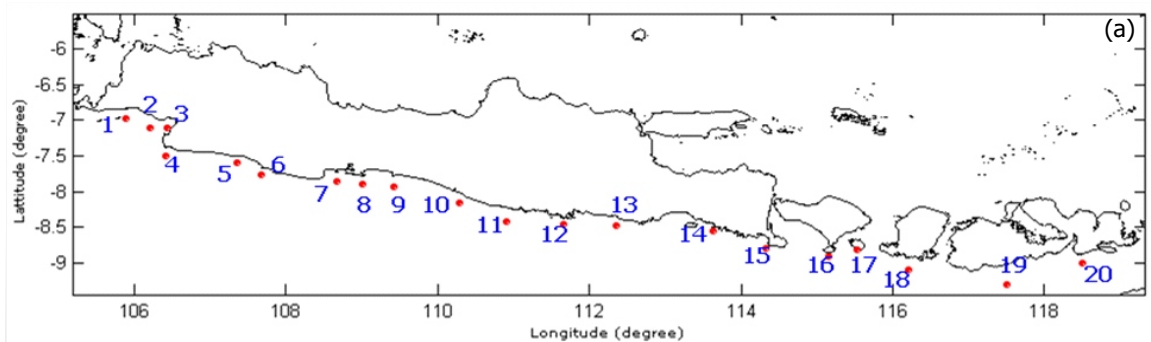
Validasi model

Verifikasi hasil model pertama kali dilakukan dengan hanya meninjau pasang surut sebagai gaya pembangkit. Karena kurangnya data lapangan di daerah studi, hasil simulasi elevasi model hanya dibandingkan dengan hasil model pasut global ORI.96 yang telah diasimilasi dengan data altimeter TOPEX/Poseidon (Matsumoto et al., 1996). Titik-titik verifikasi yang dipilih diperlihatkan pada Gambar 4a (Titik 1–20 pada Gambar 4a). Secara umum hasil model memperlihatkan kesesuaian yang cukup baik dengan hasil ORI.96 dengan koefisien korelasi berkisar 0,9681–0,9834 dan RMS error 0,0569–0,1991 m. Sedangkan, Gambar 4b memperlihatkan contoh verifikasi elevasi muka air di Pameungpeuk (Titik 6 pada Gambar 4a).

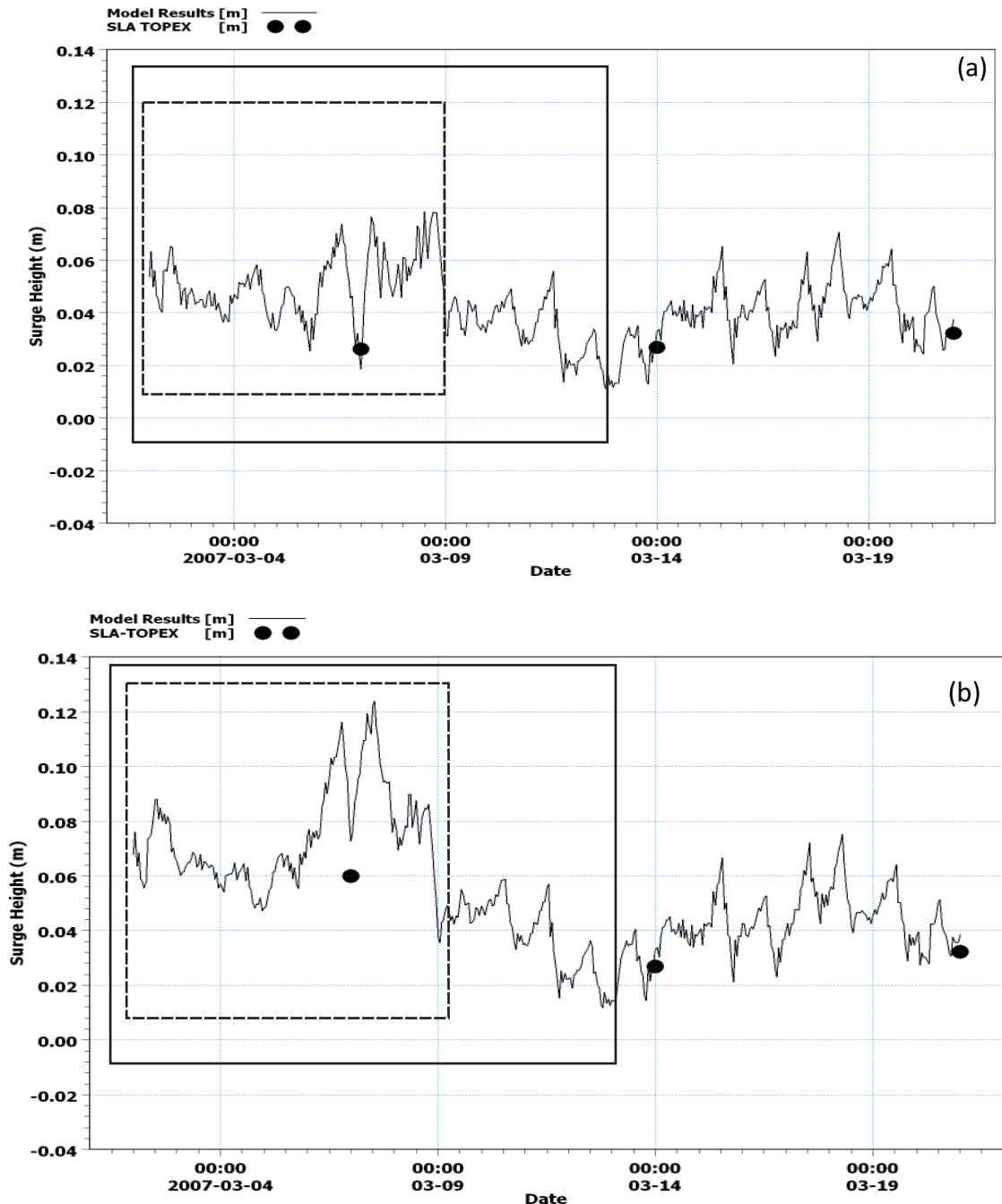
Setelah tahap verifikasi, simulasi model dilanjutkan dengan menambah gaya pembangkit selain pasang surut, yaitu: angin, tekanan udara, dan lintasan badai untuk merepresentasikan kejadian *storm surge* yang dibangkitkan oleh siklon Jacob dan George. Seperti yang dilakukan oleh Tkalich, et al., (2009), faktor pasut dipisahkan dari hasil simulasi *storm tide* untuk mendapatkan hasil simulasi yang hanya disebabkan oleh *storm surge*. Hasil simulasi yang hanya disebabkan *storm surge* ini kemudian diverifikasi dengan data mingguan anomali tinggi muka air laut, yaitu *weekly data* of TOPEX Poseidon Sea Level Anomaly (SLA), <http://apdrc.soest.hawaii.edu>.

Gambar 10 memperlihatkan verifikasi antara hasil simulasi tinggi *storm surge* dengan the TOPEX Poseidon SLA di seluruh domain model, sedangkan contoh validasi tinggi *surge* di beberapa stasiun seperti Teluk Parigi (Titik 10 pada Gambar 9a) dan Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 9a) dapat dilihat pada Gambar 5.

Secara umum, tinggi *storm surge* yang disimulasikan cukup baik verifikasinya dengan data dari the TOPEX Poseidon SLA. Dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa *storm surge* yang dibangkitkan Siklon Jacob dan George melanda pantai selatan Jawa, Bali,



Gambar 4. (a). Lokasi titik verifikasi: (1). Muara Binangun, (2). Bayah, (3). Pelabuhan Ratu, (4). Ujung Genteng, (5). Cidaun, (6). Pameungpeuk, (7). Pangandaran, (8). Cilacap, (9). Ajah (10). Parangtritis, (11). Pacitan, (12). Tanjung Watulawang, (13). Tambakrejo, (14). Bandialit, (15). Karang Tambak, (16). Bukit Badung, (17). Nusa Penida, (18). Panggung, (19). Tanjung Lingsung, dan (20). Tanjung Sebu; (b). Verifikasi elevasi muka air antara hasil simulasi model (garis titik-titik) dan hasil ORI.96 (garis penuh) di Pameungpeuk (Titik 6 pada Gambar 4a).



Gambar 5. Validasi tinggi *storm surge* pada tanggal 7, 4, dan 21 Maret 2007. Garis penuh (hasil simulasi); lingkaran penuh (the TOPEX Poseidon SLA); kotak garis penuh (periode siklon Jacob); kotak garis putus-putus (periode siklon George). a). di Teluk Parigi (Titik 10 pada Gambar 9a); (b) di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 9a).

dan NTB serta menyebabkan naiknya permukaan laut sampai dengan setinggi 19 cm. Perbedaan tinggi level laut antara hasil simulasi dan the TOPEX Poseidon SLA di 33 lokasi (Titik 1 – 33 pada Gambar 9a) diperlihatkan pada Gambar 6. Pada umumnya, tinggi *surge* hasil simulasi lebih kecil dari data TOPEX Poseidon SLA sekitar 0,03–5,20 cm.

Tinggi storm surge maksimum dan daerah genangan

Gambar 9a memperlihatkan ada 33 lokasi yang paling rentan diterjang oleh Siklon Jacob dan George, yaitu: (a). Sepanjang pantai selatan Jawa Barat adalah Tanjung Tereleng, Tanjung Panto, Tanjung Layar, Pelabuhan Ratu-A, Pelabuhan Ratu-B, Teluk Cileuh, Ujung Genteng, Tanjung Cilauteureum, Tanjung Gedeh,

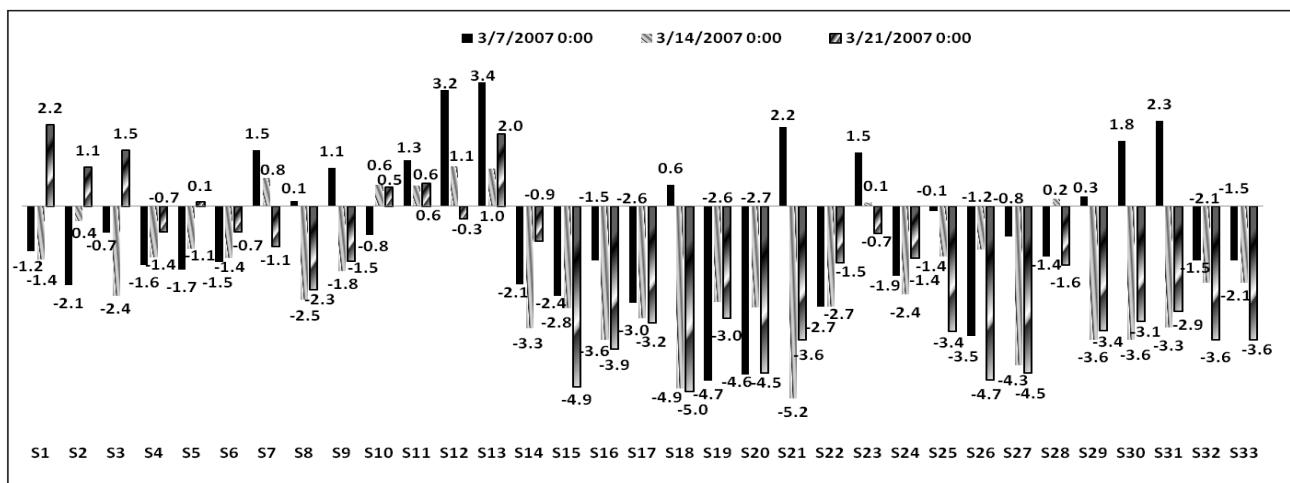
Tanjung Parigi, dan Teluk Penanjung; (b). Sepanjang pantai selatan Jawa Tengah adalah Teluk Citandui, Nusa Kambangan, dan Tanjung Karang Bata; (c). Sepanjang pantai selatan Jawa Timur, adalah Teluk Pacitan, Teluk Dukuh, Teluk Tapen, Teluk Lengkosono, Tanjung Pelindu, Teluk Bandialit, dan Teluk Grajakan; (d). Sepanjang pantai selatan Bali adalah Gilimanuk, Candi Kesuma, dan Tuban; (e). Sepanjang pantai selatan Lombok adalah Tanjung Kloto, Teluk Blongas, Teluk Gumbang, dan Tanjung Ringgit; dan (f). Sepanjang pantai selatan Sumbawa adalah Tanjung Labulawah, Teluk Cempi-A, Teluk Cempi-B, Teluk Waworada-A dan Teluk Waworada-B. Sementara itu, Gambar 9b memperlihatkan tinggi *storm surge* di lokasi-lokasi tersebut.

Dapat dilihat dari Gambar 9 bahwa *surge* tertinggi terjadi di Nusa Kambangan (Titik 13 pada Gambar 9a), yaitu ± 0,19 m (17:00 UTC, 7 Maret 2007). Sementara itu, Gambar 7 memperlihatkan tinggi *surge* maksimum di 33 lokasi yang paling rentan diterjang *storm surge* yang dibangkitkan Siklon Jacob dan George (Titik 1-33 pada Gambar 9a).

Gambar 8 memperlihatkan contoh dari hasil simulasi pasut astronomis, *storm tide*, dan *storm surge* di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 9a). Berdasarkan hasil simulasi pada studi ini, tinggi *storm surge* hasil simulasi ordenya hanya beberapa sentimeter (<20 cm), sehingga kelihatannya Siklon Jacob dan George pada Maret 2007 tidak membangkitkan *storm surge* yang tinggi di sepanjang pantai selatan Jawa, Bali, dan NTB. Tidak seperti kejadian gelombang yang tinggi di sepanjang pantai selatan Jawa pada Mei 2007, yang secara intensif dilaporkan baik di media cetak maupun elektronik, maka untuk kejadian *storm surge* Maret 2007 laporannya memang sangat terbatas atau bahkan tidak ada.

Seperti yang telah disampaikan pada bagian pendahuluan, untuk kasus gelombang tinggi Mei 2007, berapa besar pengaruh gaya pembangkit yang mungkin berkontribusi seperti Gelombang Kelvin, pasang surut, dan *storm* yang terjadi di Tanjung Harapan (Afrika Selatan) dalam membangkitkan gelombang tinggi di selatan Jawa masih belum diketahui. Sementara itu, untuk mereduksi jumlah grid komputasi maka domain studi dibatasi, sehingga pada studi saat ini tidak ditinjau *storm surge* yang dibangkitkan badai tropis yang terjadi di Tanjung Harapan pada Mei 2007. Sebagai studi awal, hanya ditinjau badai tropis yang lintasannya relatif dekat dengan pantai selatan Jawa, Bali dan NTB, seperti Siklon Jacob dan George Maret 2007

Tabel 1 memperlihatkan nilai maksimum jarak inundasi horisontal dari *storm tide flooding*, tinggi *run-up* vertikal, dan kedalaman total di sekitar jarak maksimum inundasi horisontal di 6 lokasi yang merepresentasikan daerah pantai selatan Jawa Barat (Teluk Penanjung, Titik 11 pada Gambar 9a), Jawa Tengah (Tanjung Karang Bata, Titik 14 pada Gambar 9a), Jawa Timur (Tanjung Pelindu, Titik 19 pada Gambar 9a), Bali (Tuban, Titik 24 pada Gambar 9a), Lombok (Tanjung Ringgit, Titik 28 pada Gambar 9a), dan Sumbawa (Teluk Cempi, Titik 31 pada Gambar 9a). Di antara 33 lokasi pada Gambar 7 dan 9a, Teluk Cileuh (Titik 6 pada Gambar 7 dan 9a) dan Teluk Waworada-A (Titik 32 pada Gambar 7 dan 9a) mengalami jarak *storm tide flooding* minimum (tabel dan gambar tidak diperlihatkan). Analisis *slope* (kemiringan) topografi memperlihatkan bahwa faktor kemiringan dapat menjadi salah satu faktor jauh dekatnya inundasi yang terjadi. Sebagai contoh, di sepanjang pantai selatan Jawa Barat jarak inundasi maksimum terjadi di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 9a). Analisa *slope* topografi memperlihatkan bahwa topografi Teluk



Gambar 6. Perbedaan tinggi muka laut (dalam cm) antara hasil simulasi dengan data the TOPEX Poseidon SLA (00:00 UTC pada 7, 14, and 21 Marer 2007) di 33 lokasi (Titik 1 – 33 pada Gambar 9a).

Tabel 1. Jarak horisontal maksimum dari banjir gelombang badai pasang (*storm tide flooding*) dan tinggi *run-up* vertikal pada lokasi jarak inundasi maksimum, serta kedalaman total di sekitar lokasi jarak inundasi maksimum

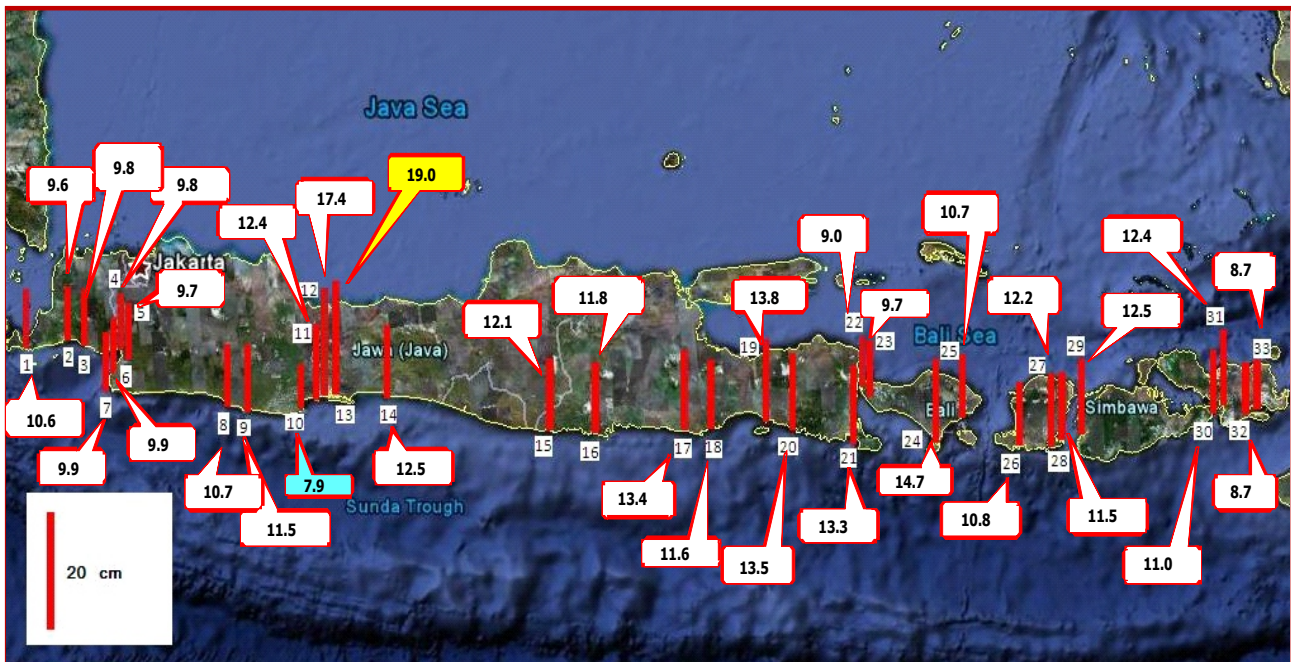
No.	Locations	Run – up and Inundation (Flooding)								
		Maximum Horizontal Distance of Inundation (m)			Vertical Run-up at the Location of Maximum Distance of Inundation (m)			Total Water Depth around the Location of Maximum Horizontal Distance of Inundation (m)		
		Storm+ Tides	Tides	Storm	Storm + Tides	Tides	Storm	Storm+ Tides	Tides	Storm
Jawa Barat:										
11	Teluk Penanjung	835,2	489,2	346,0	0,73	0,64	0,09	0,07	0,23	-0,16
Jawa Tengah:										
14	Tanjung Karang Bata	405,6	319,7	85,9	0,75	0,65	0,10	0,15	0,34	-0,19
Jawa Timur:										
19	Tanjung Pelindu	710,6	365,4	345,2	0,93	0,85	0,08	0,06	0,15	-0,09
Bali:										
24	Tuban	623,5	623,5	0,0	1,02	0,90	0,12	0,46	0,3	0,16
Lombok:										
28	Tanjung Ringgit	1112,3	1112,3	0,0	1,03	0,98	0,05	0,17	0,13	0,04
Sumbawa:										
31	Teluk Cempi	4136,5	3874,3	262,2	1,10	0,90	0,20	0,14	0,09	0,05

Penanjung sekitar 0,044°, dimana lebih landai dibandingkan topografi Teluk Cileuh, yaitu 0,148°. Perbedaan ini dapat merupakan salah satu penyebab jauhnya inundasi di Teluk Penanjung, sedangkan slope yang terjal di Teluk Cileuh akan mengurangi jarak inundasi.

Pada studi saat ini, hasil model dari ketinggian surge (gelombang badai) secara kuantitatif dan kualitatif telah diverifikasi dengan data *the TOPEX Poseidon SLA*. Selain itu, hasil simulasi telah dapat memperlihatkan daerah mana saja di kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan NTB yang paling rentan diterjang gelombang badai yang dibangkitkan badai tropis di Samudera Hindia. Daerah yang paling rentan terkena dampak *storm surge* di kawasan pesisir selatan Jawa yang dihasilkan pada studi saat ini (gaya pembangkitnya adalah siklon Jacob dan George di perairan barat laut Australia pada Maret 2007) secara kualitatif sama dengan yang dilaporkan oleh Kompas (19 Mei 2007) walaupun siklon tropis yang ditinjau sebagai gaya pembangkit berbeda (badai tropis di Tanjung Harapan pada bulan Mei 2007). Kompas (19 Mei 2007) melaporkan bahwa di kawasan pesisir selatan Jawa, daerah yang paling rentan terkena dampak gelombang tinggi pada Mei 2007 adalah pantai selatan Cilacap dan Kebumen yang keduanya dekat dengan daerah yang paling rentan terhadap dampak *storm surge* yang diperoleh dari studi saat ini, yaitu Teluk Penanjung, Teluk Citandui, dan Nusa Kambangan (dekat dengan pantai selatan Cilacap,

masing-masing ditandai dengan Titik 11–13 pada Gambar 7 dan 9a) dan Tanjung Karang Bata (dekat dengan pantai selatan Kebumen, ditandai dengan Titik 14 pada Gambar 7 dan 9a).

Studi saat ini telah dapat mensimulasikan daerah yang tergenang gelombang yang dibangkitkan pasang surut dan siklon tropis di kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan NTB. Di pantai selatan Jawa Barat, jarak inundasi maksimum dari gelombang badai pasang (*storm tide*) terjadi di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 7 dan 9a), sekitar 835,2 m dengan tinggi *run-up* di lokasi inundasi maksimum adalah 0,73 m (Tabel 1 dan Gambar 11). Hasil simulasi dari batas-batas daerah genangan dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 11. Di pantai selatan Jawa Tengah, inundasi maksimum mencapai 405,6 m di Tanjung Karang Bata (Titik 14 pada Gambar 7 dan 9a) dengan tinggi *run-up* sekitar 0,75 m (Tabel 1). Di pantai selatan Jawa Timur, daerah genangan maksimum terjadi di Tanjung Pelindu (Titik 19 pada Gambar 7 dan 9a) dengan jarak inundasi horisontal dan tinggi *run-up* masing-masing adalah 710,6 m dan 0,93 m (Tabel 1). Untuk kawasan pesisir selatan Bali, inundasi maksimum terjadi di Tuban (Titik 24 pada Gambar 7 dan 9a) sebesar 623,5 m dengan tinggi *run-up* 1,02 m, sedangkan di daerah pantai selatan Lombok, terjadi di Tanjung Ringgit (Titik 28 pada Gambar 7 dan 9a) dengan jarak inundasi 1112,3 m dan tinggi *run-up* 1,03 m. Sementara itu, untuk kawasan pesisir



Gambar 7. Tinggi *storm surge* maksimum (dalam cm) di 33 lokasi yang paling rentan diterjang *storm surge* yang dibangkitkan oleh Siklon Jacob dan George pada Maret 2007 (nama-nama dari lokasi disebutkan dan ditunjukkan dengan Titik 1 – 33 pada Gambar 9). Sumber peta: Google Earth.

Sumbawa, inundasi maksimum terjadi di Teluk Cempi sebesar 4136,5 m dengan tinggi *run-up* 1,10 m.

Sebagai informasi tambahan, pada Gambar 12 dan 13c diperlihatkan contoh hasil simulasi *total water depth* di sepanjang daerah genangan *storm tide* untuk daerah Teluk Penanjung dan Teluk Cempi (masing-masing ditandai dengan Titik 11 dan 31 pada Gambar 7 dan 9a). Hasil penelitian pada tulisan ini (zonasi daerah rawan bencana gelombang badai pasang) selain dapat digunakan untuk mitigasi bencana laut dalam rangka mereduksi jumlah korban, kerugian ekonomi, dan kerusakan lingkungan, dapat pula digunakan sebagai masukan (rekomen-dasi) untuk meningkatkan upaya-upaya pemerintah dalam membangun daerah pesisir secara tepat, terintegrasi, efisien, serta berwawasan lingkungan.

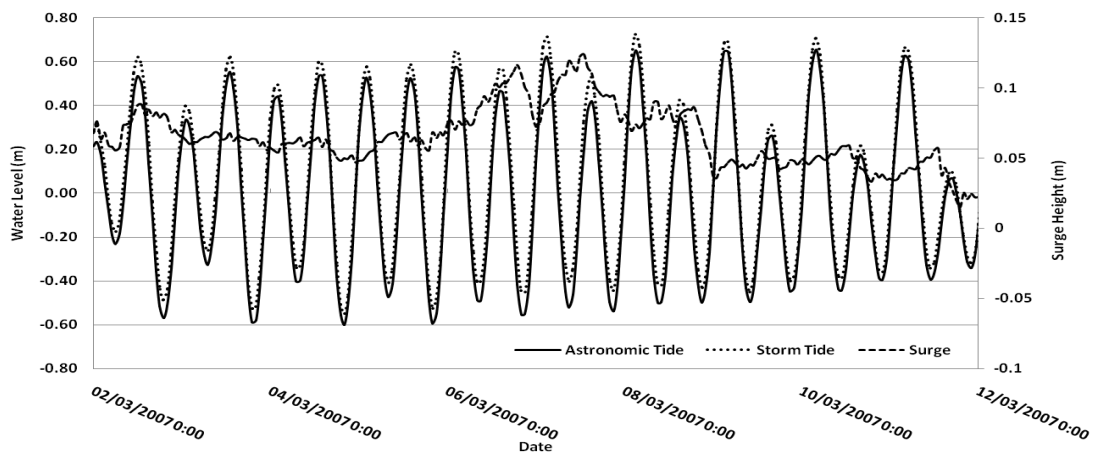
Kesimpulan

Hasil simulasi pada studi ini memperlihatkan bahwa walaupun siklon Jacob dan George pada Maret 2007 tidak membangkitkan gelombang badai yang tinggi di sepanjang pantai selatan Jawa, Bali, dan NTB (tinggi *surge* < 20 cm), kawasan pesisirnya tetap rentan tergenang oleh gelombang badai tersebut. Gelombang badai tertinggi terjadi di Nusa Kambangan sekitar 0,19 m. Sedangkan, jarak inundasi maksimum terjadi di

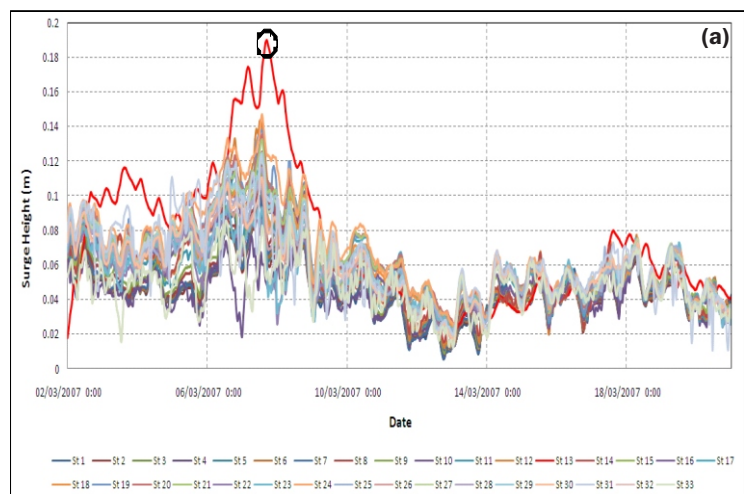
Teluk Penanjung (835,2 m dengan tinggi *run-up* 0,73 m) untuk pantai selatan Jawa Barat. Di pantai selatan Jawa Tengah, inundasi maksimum terjadi di Tanjung Karang Bata (405,6 m; tinggi *run-up* 0,75 m). Untuk pantai selatan Jawa Timur, daerah genangan maksimum terjadi di Tanjung Pelindu (inundasi horisontal 710,6 m dan *run-up* 0,93 m). Di pesisir selatan Bali, inundasi maksimum terjadi di Tuban (623,5 m dengan tinggi *run-up* 1,02 m), sedangkan di daerah pantai selatan Lombok, terjadi di Tanjung Ringgit (jarak inundasi 1112,3 m dan tinggi *run-up* 1,03 m). Sementara itu, untuk kawasan pesisir Sumbawa, inundasi maksimum terjadi di Teluk Cempi (4136,5 m dan tinggi *run-up* sebesar 1,10 m).

Ucapan Terima Kasih

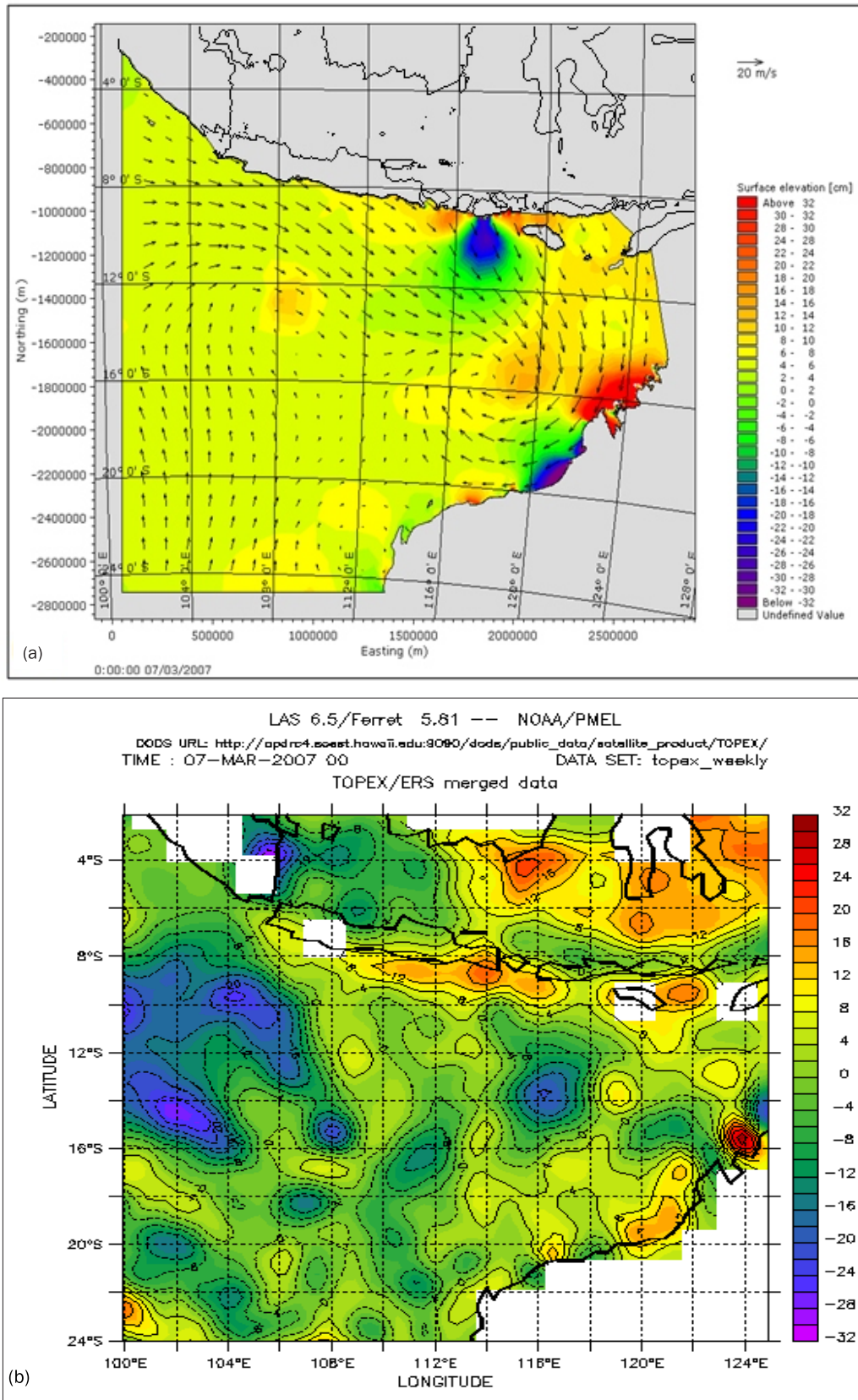
Terima kasih kami ucapkan kepada DIKTI dan ITB yang telah membantu mendanai riset ini melalui Riset Hibah Kompetitif Penelitian sesuai Prioritas Nasional Batch I No. PN-7-36-2009 dan Riset KK ITB No. 082b/KO1.18/PL/2008. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada D. A. Utami, N. Rakhmaputeri, D. F. Saputri, dan H. Timotius yang telah memberikan literatur-literatur yang sangat bernilai yang berkaitan dengan aspek-aspek *storm surge*. Selain itu, pada kesempatan ini tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada *reviewer* yang telah mengoreksi artikel ini



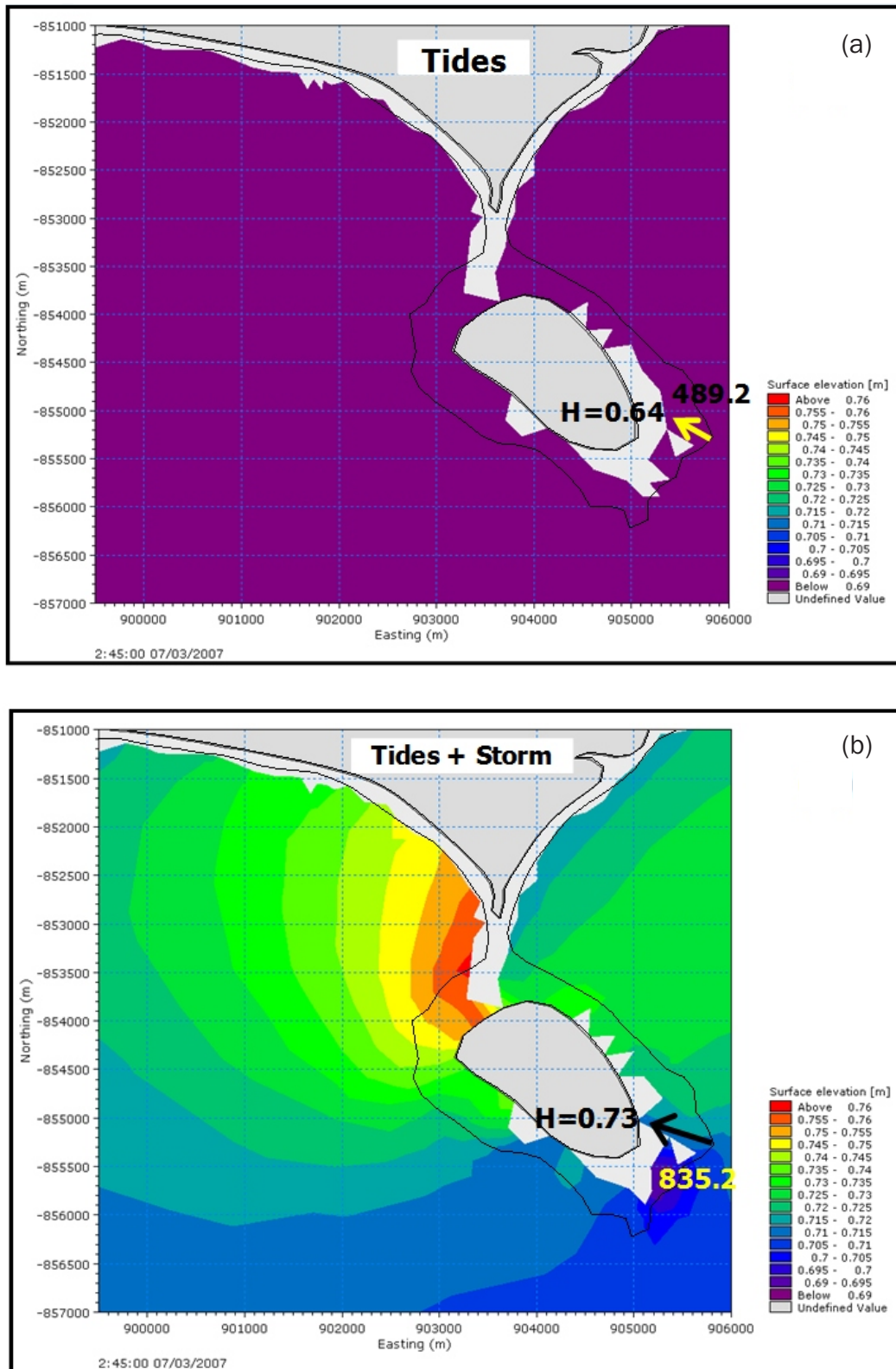
Gambar 8. Tinggi pasut astronomis, storm tide, dan storm surge di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 9a).



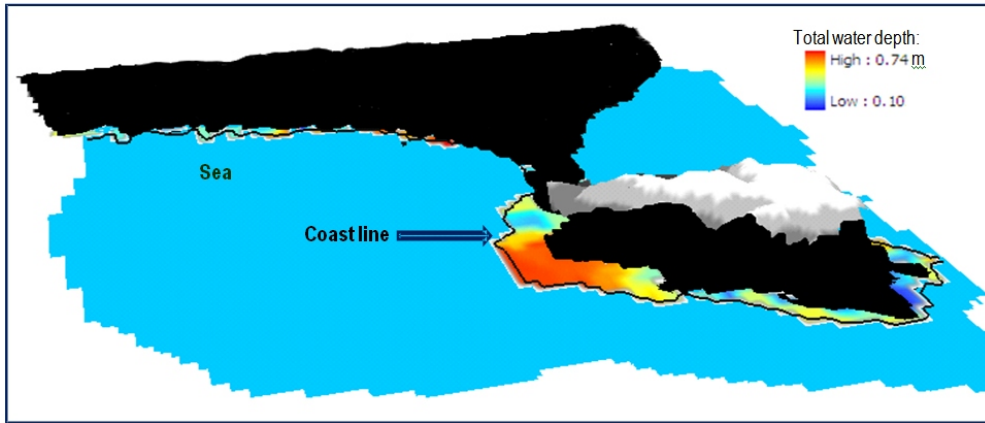
Gambar 9. (a). Daerah yang paling rentan diterjang storm surge yang dibangkitkan Siklon Jacob dan George, yaitu: (1). Tanjung Tereleng; (2). Tanjung Panto; (3). Tanjung Layar; (4). Pelabuhan Ratu-A; (5). Pelabuhan Ratu-B; (6). Teluk Cileuh; (7). Ujung Genteng; (8). Tanjung Cilauteureum; (9). Tanjung Gedeh; (10). Tanjung Parigi; (11). Teluk Penanjung; (12). Teluk Citandui; (13). Nusa Kambangan; (14). Tanjung Karang Bata; (15). Teluk Pacitan; (16). Teluk Dukuh; (17). Teluk Tapan; (18). Teluk Lengkosono; (19). Tanjung Pelindu; (20). Teluk Bandialit; (21). Teluk Grajakan; (22). Gilimanuk; (23). Candi Kesuma; (24). Tuban; (25). Tanjung Kloto; (26). Teluk Blongas; (27). Teluk Gumbang; (28). Tanjung Ringgit; (29). Tanjung Labulawah; (30). Teluk Cempi-A; (31). Teluk Cempi-B; (32). Teluk Waworada-A; (33). Teluk Waworada-B. (b). Tinggi storm surge di lokasi-lokasi pada Gambar 9a; lingkaran hitam adalah surge tertinggi yang terjadi di Nusa Kambangan (Titik 13 pada Gambar 9a). Sumber peta: Google Earth.



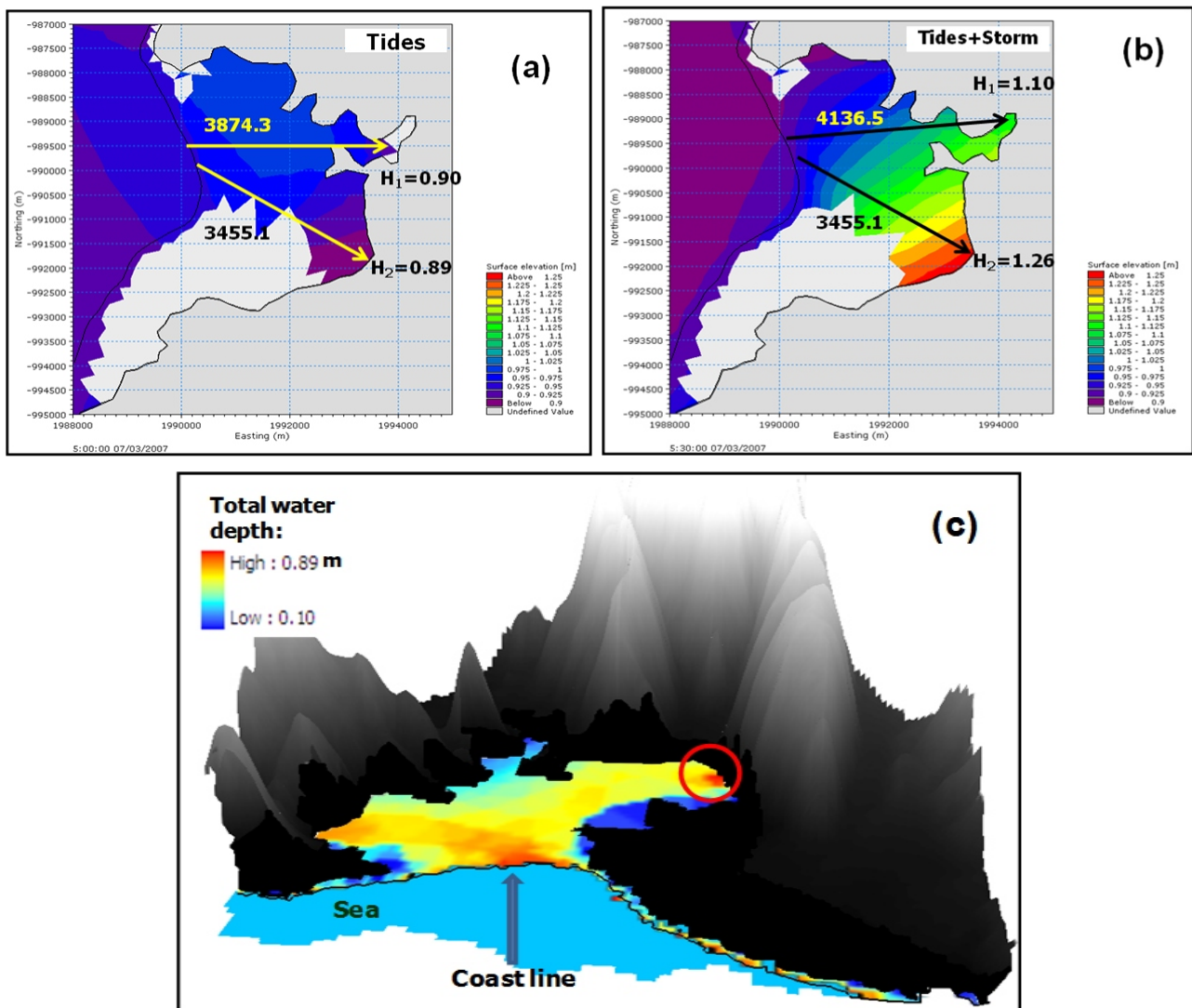
Gambar 10. Validasi dari tinggi *storm surge* yang dihitung pada tanggal 7 Maret 2007 00:00 UTC. (a). Hasil simulasi (cm). Tanda panah menunjukkan kecepatan dan arah angin (m/dt); (b). The TOPEX Poseidon SLA (cm), (Sumber:).



Gambar 11. Simulasi daerah inundasi (jarak dan tinggi *storm tide flooding*, dalam meter) di Teluk Penanjung (Titik 11 pada Gambar 7 dan 9a), pada waktu 02:45 UTC, 7 Maret 2007. Garis pada gambar menyatakan kontur topografi 0 dan 3 m yang diukur dari *mean sea level*. (a). Daerah inundasi yang disebabkan pasang surut; (b) Daerah inundasi yang disebabkan badai pasang (pasang surut dan storm).



Gambar 12. Hasil simulasi kedalaman total dari daerah inundasi yang disebabkan badai pasang (*storm tide*) di Teluk Pananjung (Titik 11 pada Gambar 7 dan 9a) pada jam 02:45 UTC, 7 Maret 2007.



Gambar 13. Simulasi daerah inundasi (jarak dan tinggi *storm tide flooding*, dalam meter) di Teluk Cempi –Sumbawa (Titik 31 pada Gambar 7 dan 9a), pada waktu 05:30 UTC, 7 Maret 2007. Garis pada gambar menyatakan kontur topografi 0 dan 3 m yang diukur dari *mean sea level*. (a). Daerah inundasi yang disebabkan pasang surut; (b) Daerah inundasi yang disebabkan badai pasang (pasang surut dan *storm*); (c) Hasil simulasi kedalaman total dari daerah inundasi yang disebabkan badai pasang (*storm tide*) di Teluk Cempi.

Daftar Pustaka

- Anugrah, S.D., Ningsih, N.S., & Latief, H., 2010. The South Indian Ocean Tropical Cyclones and Its Influences to The South Coast of Java, Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE), 27-29 May, 2010, Yogyakarta, Indonesia.
- Arief, D., & Murray, S. P., 1996. Low frequency fluctuations in the Indonesian throughflow through Lombok Strait, *J. Geophys. Res.*, 101:12,455-12,464.
- DHI Water and Environment, 2005. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM; hydrodynamics and transport module, Scientific Documentation, Denmark.
- Garrison, T. 2006. *Essential of Oceanography*, Thomson Learning, Inc
- <http://apdrc.soest.hawaii.edu>. (10 Januari 2010)
- <http://encarta.msn.com/> (15 Januari 2010)
- <http://maps.google.com/> (18 Januari 2010)
- http://images.google.co.id/images/storm_area/(10 Februari 2010)
- IOC, IHO, & BODC. 2003. General bathymetric chart of the oceans, Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, BODC, Liverpool, U.K.
- Kompas, 19 Mei 2007. Webpage: <http://www.kompas.com/> (25 Mei 2007)
- Matsumoto, K., Ooe, M., Sato, T., & Segawa, J., 1996. Harmonic analysis of data from crossover points. A Collection of Global Ocean Tide Models CD ROM, distributed by JPL, PO. DAAC and CSR.
- Meyers, G.. 1996. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño-Southern Oscillation, *J. Geophys. Res.*, 101:12.255-12,263.
- Michida, Y., & Yoritaka, H., 1996. Surface currents in the area of the Indo-Pacific throughflow and in the tropical Indian Ocean observed with surface drifters, *J. Geophys. Res.*, 101:12.475-12.482.
- Padman, L. & Erofeeva, S., 2005. Tide Model Driver (TMD) Manual, Earth & Space Research.
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Martugudde, R., & Susanto, R. D., 2000. A semiannual Indian Ocean forced Kelvin wave observed in the Indonesian seas in May 1997, *J. Geophys. Res.*, 105:17.217-17.230.
- SRT. 2007. Shuttle Radar Topography Mission X SAR/SRTM. Webpage: <http://www.dlr.de/srtm>. (25 Februari 2010)
- Tkalich, P., Kolomiets, P., & Zheleznyakm, M., 2009. Simulation of wind-induced anomalies in the South-China Sea. Paper presented at the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2009 Annual General Meeting, Singapore.
- Tjasyono, B., & Harijono, S.W.B., 2008. *Meteorologi Indonesia 1, Karakteristik dan Sirkulasi Atmosfer*, BMKG, Jakarta - Indonesia.
- Yamagata, T., Mizuno, K., & Masumoto, Y. 1996. Seasonal variations in the equatorial Indian Ocean and their impact on the Lombok throughflow, *J. Geophys. Res.*, 101: 12.465-12.473.
- Wijffels, S., & Meyers, G. 2004. An intersection of oceanic waveguides: variability in the Indonesian throughflow region, *J. Phys. Oceanogr.*, 34:232-1253.