

SIMULASI STORM-SURGE DI SELAT BANGKA DENGAN MENGGUNAKAN COUPLED ADCIRC DAN SWAN MODEL

(Storm-Surge Simulation in Bangka Strait Using the Coupled ADCIRC and SWAN Models)

oleh/by

Ibnu Sofian¹

¹Peneliti pada Badan Informasi Geospasial

email : ibnusofian@bakosurtanal.go.id

Diterima (received): 9 Oktober 2012; Disetujui untuk dipublikasikan (accepted): 21 November 2012

ABSTRAK

Simulasi storm-surge di selat Bangka dilakukan dengan menggunakan coupled model ADvanced CIRCulation (ADCIRC) dan model gelombang generasi ketiga SWAN. Simulasi ini dilakukan untuk melihat seberapa tinggi bahaya badai terhadap keamanan PLTN yang akan dibangun di Pulau Bangka. Secara umum, hasil model relatif sesuai dengan hasil pengukuran pasut. Namun hasil model cenderung over-estimate 10 - 30 cm, terutama pasca terjadinya badai Hagibis dan Mitag. Ketinggian gelombang di bagian utara Selat Bangka lebih tinggi dari tinggi gelombang di bagian tengah dan selatan. Meskipun tinggi gelombang hanya beberapa puluh sentimeter, namun stres angin dan gelombang laut, perubahan tekanan Atmosfer di permukaan dan arus permukaan yang kuat dapat menyebabkan kenaikan tinggi muka laut yang ekstrim lebih dari 70 cm. Permukaan laut (sea level) semakin tinggi ketika Badai Hagibis dan Mitag semakin kuat, dan mencapai puncak pada 21 dan 22 November 2007. Selanjutnya kekuatan badai melemah dan bergerak ke utara, ketinggian sea level turun, meskipun permukaan air laut masih tinggi di akhir periode badai. Sebagai penutup, tinggi sea level ekstrim ini dapat mempertinggi risiko terjadinya rob di Pulau Bangka.

Kata Kunci: Simulasi, Storm-Surge, Bangka, Coupled Model, ADCIRC, SWAN

ABSTRACT

Simulation of storm-surge at the Bangka Strait was carried out using coupled models which are ADvanced CIRCulation model (ADCIRC) and the 3th generation of wave model (SWAN). The model simulation was carried out to investigate the impact of storm surges on the Nuclear Power Plant that planned in Bangka Island. In general, the model results relatively match with the tide gauge observation. However, the - sea level modeled tends to over-estimate about 10cm to 30cm, especially during the post-Hagibis and Mitag Storms. The wave height in the northern part of Bangka Strait was higher than the one in southern and central of Bangka Strait. Eventhough, the wave height is only several tens centimeters, the wave and wind stresses, surface pressure changes and the current speed can elevate the extreme sea level rise for more than 70cm. The sea level is getting higher when the Mitag and Hagibis are getting stronger, and reached to peak in 21 to 22 November 2007. The storm surge was weaker and moved to the north, and sea level drops, thereafter. Finally, this extreme sea level rise heightens the coastal flooding risk in the Bangka Island.

Keywords: Simulation, Storm-Surge, Bangka, Coupled Model, ADCIRC, SWAN

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Dengan semakin meningkatnya konsentrasi Gas Rumah Kaca di Atmosfer, yang mencapai 408 ppm, pada tahun 2010, menyebabkan peningkatan suhu bumi. Dan pada akhirnya, menyebabkan terjadinya perubahan pola curah hujan sebagai salah satu indikator iklim, kenaikan suhu udara, permukaan laut, dan *sea level*.

Seiring dengan semakin intensifnya proses pemanasan global, intensitas terjadinya El Niño dan La Niña semakin meningkat. Pada umumnya El Niño terjadi antara 2 sd. 7 tahun sekali, tetapi sejak tahun 1970, frekuensi El Niño dan La Niña menjadi 2 sd. 4 tahun. Sebagai tambahan, pada waktu terjadinya El Niño tahun 1997/1998, Indonesia pada umumnya mengalami musim kering yang panjang, dan pada saat terjadinya La Niña tahun 1999, Indonesia mengalami kenaikan curah hujan yang tinggi, dan kenaikan *sea level* sebesar 20 sd. 30 cm, sehingga menyebabkan banjir di sebagian besar wilayah Indonesia, terutama di wilayah pesisir. Sementara itu, berdasarkan hasil penelitian yang terdahulu, dengan menggunakan data *sea level* di Laut Jawa hasil model IPCC, menunjukkan bahwa frekuensi El Niño dan La Niña dari tahun 2000 sd. 2100, akan meningkat menjadi 2 tahun sekali. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan pola curah hujan dan total curah hujan. Disamping itu berpotensi menyebabkan terjadinya cuaca ekstrim yang berdampak pada sektor pertanian, transportasi darat dan laut serta bencana alam seperti angin puting beliung maupun tanah longsor.

Rata-rata kekuatan siklon tropis di Samudera Atlantik menguat, dengan kecepatan angin maksimum meningkat sebesar $0,4\text{ms}^{-1}\text{yr}^{-1}$ (Webster, *et al.*, 2005). Selanjutnya para ahli oseanografi menjelaskan bahwa meningkatnya frekuensi dan intensitas dari siklon terkuat tahunan disebabkan oleh pemanasan

global, sebaliknya jumlah dan durasi hari kejadian siklon menurun di semua samudera, kecuali di Atlantik Utara selama satu dekade terakhir ini. Meskipun mekanisme fisis penyebab penurunan jumlah dan durasi hari kejadian siklon masih belum jelas, tetapi hal ini mungkin disebabkan oleh lebih banyaknya tahun tahun El Niño dibandingkan dengan La Niña pada beberapa dekade terakhir ini.

Seiring dengan meningkatnya frekuensi variabilitas iklim, menyebabkan terjadinya beberapa kecelakaan dan terhambatnya arus barang dengan menggunakan transportasi laut. Hal ini disebabkan oleh tingginya gelombang laut yang diakibatkan oleh peningkatan kecepatan angin di Samudera Pasifik Selatan, karena terbentuknya badai tropis di daerah tersebut, terutama di sebelah barat Filipina dan Laut China Selatan. Kegiatan ini dilakukan untuk dampak badai tropis (*storm surge*) yang terjadi di Laut China Selatan dan Badai Mitag di barat Filipina terhadap karakteristik *sea level* (tinggi muka laut) di Selat Bangka, dengan menggunakan *coupled model* Advanced CIRCulation model (ADCIRC) dan SWAN (Dietric, *et al.*, 2011). Selain menggunakan hasil model, juga digunakan data pasang surut di Ko Lak (Thailand), Singapura, Legaspi (Filipina) dan Malakal (Palao).

Disamping analisa dampak badai tropis terhadap kenaikan *sea level*, pada penelitian ini juga dilakukan analisa *sea level rise* (SLR) menggunakan data altimeter dari tahun 1991 sampai 2011. Data altimeter digunakan untuk menganalisa SLR karena penambahan volume air laut akibat pencairan es, maupun ekspansi termal air laut.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk melihat dampak badai tropis dan *storm-surge* terhadap karakteristik *sea level* di Selat Bangka. Berdasarkan beberapa hal latar belakang kenaikan *sea level*, maka tujuan

dari penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Rekonstruksi tinggi gelombang di Selat Bangka dengan menggunakan model Coupled ADCIRC dan SWAN.
2. Untuk mengetahui mekanisme fisis kenaikan *sea level* di Selat Bangka akibat badai tropis Hagibis di Laut China Selatan.
3. Sebagai dasar dan acuan analisa keamanan PLTN yang akan dibangun di Pulau Bangka.

Data dan Konfigurasi Model

Data

Data *sea level* yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Data rata-rata *sea level* bulanan hasil model HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) untuk wilayah Indonesia (KLH, 2011).
2. *Forcing* pasang surut pada daerah batas (*boundary*), digunakan data IND-TPXO, solusi pasang surut untuk perairan Indonesia dengan melakukan asimilasi antara data stasiun pasang surut dan altimeter. Sementara sebagian batas lainnya digunakan data *Indian Ocean* TPXO (IO-TPXO). Data konstanta harmonik pasut terdiri dari M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 dan Q1.

Selanjutnya data Atmosfer yang digunakan sebagai input untuk model ADCIRC+ SWAN, meliputi:

1. Data kecepatan dan arah angin, menggunakan data *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) *Ocean Surface Wind* (Atlas, *et al*, 2008, 2009).
2. Data tekanan Atmosfer di permukaan, menggunakan data NCEP Reanalysis II (Kanamitsu, *et al*, 2002).

Konfigurasi Model

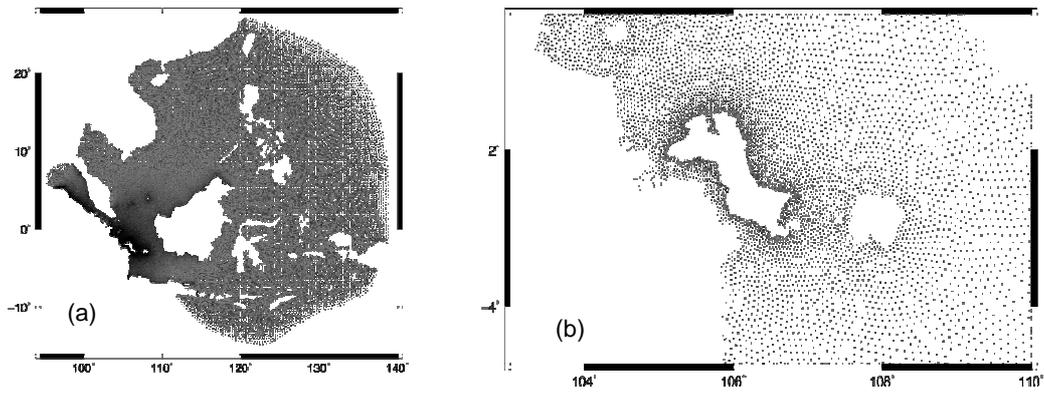
Model sirkulasi dan gelombang laut, memiliki keterbatasan pada resolusi temporal, spasial dan spektral (Dietrich, 2011). Keterbatasan ini dapat diatasi

dengan menggunakan metode nesting, dari model satu ke lainnya, ataupun dengan menggunakan model yang sama dengan tingkat resolusi yang berbeda.

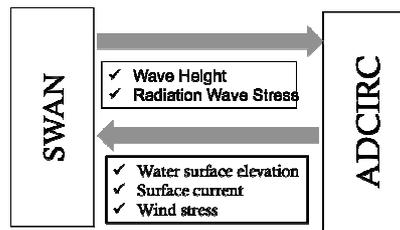
Model dengan menggunakan metode *finite-element* memberikan solusi untuk perubahan resolusi pada skala lokal, baik batimetri, geometri maupun proses alirannya. Aplikasi model *finite-element* biasanya digunakan untuk permodelan banjir di daerah pantai, dengan resolusi yang bervariasi dari resolusi rendah sampai tinggi pada daerah studi yang diinginkan (Westerink, *et al.*, 2008). Solusi ini, tidak hanya mempersingkat waktu komputasi, juga dapat memberikan hasil dengan akurasi tinggi pada daerah lokal yang diinginkan (Dietrich, *et al.*, 2011).

Konfigurasi grid pada model domain yang digunakan pada studi ini dapat dilihat pada **Gambar 1a**, dengan resolusi 20 km pada daerah terluar (*boundary*), dan 500 m pada daerah studi seperti yang terlihat pada **Gambar 1b**. *Coupled model* antara ADCIRC dan SWAN mempunyai beberapa keunggulan disamping penggunaan metode *finite-element* yang memungkinkan perbedaan resolusi spasial dalam satu *model domain*, tetapi juga keunggulan SWAN (Booij, *et al.*, 1999; Rogers, *et al.*, 2003) dalam simulasi gelombang di perairan dangkal dan daerah pantai (Dietrich, *et al.*, 2011). Diagram sederhana hubungan antara ADCIRC dan SWAN dapat dilihat pada **Gambar 2**.

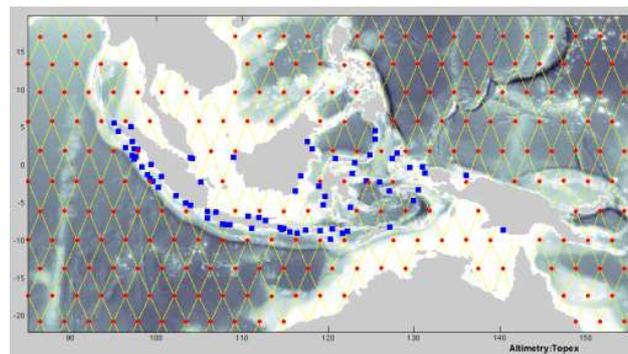
Kondisi batas barat, timur dan selatan didasarkan pada IND-TPXO, sedangkan batas utara ditentukan dari IO-TPXO. Koreksi konstanta harmonik pasang surut dilakukan menggunakan metode asimilasi *Ocean Tidal Inverse Solutions* (OTIS) (Egbert and Erofeeva, 2002). Contoh koreksi konstanta pasut K1 dapat dilihat pada **Gambar 3**. Komponen K1 non-asimilasi lebih rendah dari K1 hasil asimilasi di selatan dan utara Selat Karimata. Selain itu, K1 hasil asimilasi juga menunjukkan nilai yang tinggi di selatan Pulau Papua, lebih tinggi dari nilai K1 di utara Australia.



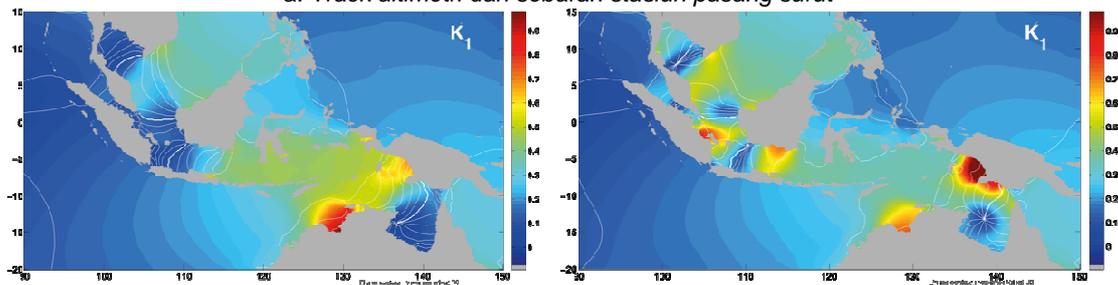
Gambar 1. Konfigurasi Grid di (a) Domain Model dan (b) Selat Bangka dan sekitarnya



Gambar 2. Skema Sederhana Hubungan antara SWAN dan ADCIRC



a. Track altimetri dan sebaran stasiun pasang surut



b. Komponen K_1 tanpa asimilasi

c. Komponen K_1 hasil asimilasi

Gambar 3. Asimilasi antara data stasiun pasang surut dan altimeter untuk mendapatkan konstanta harmonik pasut

Model Algoritma

Model gelombang SWAN melakukan prediksi evolusi gelombang dalam ruang geografis \vec{x} dan waktu t dari aksi spektrum densitas aksi gelombang $N(\vec{x}, t, \sigma, \theta)$ dengan σ relatif frekuensi dan θ arah gelombang, sebagaimana diatur oleh persamaan keseimbangan aksi (Booij, *et al*, 1999), seperti tersaji pada **Persamaan 1**. Penghitungan tinggi permukaan laut dilakukan ADCIRC, dengan menggunakan persamaan *Generalized Water Continuity Equation* (GWCE) seperti pada **Persamaan 2**. Sementara kuat arus dan arah arus ditentukan dengan persamaan momentum, pada **Persamaan 3** dan **4**. Detil model algoritma dan peramaan fisis yang digunakan dalam model ini, dapat dilihat di Dietrich, *et al.*, 2011.

Validasi Model

Validasi hasil model dilakukan dengan menggunakan data pasang surut di Ko Lak (Thailand), Singapura, Malakal (Palao) dan Legaspi (Filipina) yang

tersedia secara online di *University of Hawa’ai Sea Level Center* (UHSLC). Data pasut Ko Lak dan Singapura digunakan untuk validasi dampak badai Hagibis terhadap karakteristik *sea level* di Laut China Selatan. Sementara, data pasut Malakal dan Legaspi digunakan untuk validasi hasil model gelombang di timur Filipina akibat badai Mitag. **Gambar 4**, menunjukkan *time-series* evolusi *residual sea level* (RSL) baik dari model maupun stasiun pasut. RSL dihitung dengan mengurangi hasil model atau observasi dengan prediksi pasut berdasarkan konstanta harmonik astronomis. Dengan kata lain, RSL adalah fluktuasi pasang surut yang disebabkan oleh faktor meteorologis atau *atmospheric tide*.

Secara umum, hasil model relatif sesuai dengan hasil pengukuran pasut. Meskipun, hasil model cenderung over-estimate 10 s.d 30 cm, terutama pasca terjadinya badai Hagibis maupun Mitag. Terlihat juga bahwa hasil model di Singapura cenderung linier dengan osilasi yang tidak terlalu besar dibandingkan

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_g N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_g N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} - UH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - VH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[\zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right] + \frac{\tau_{xx,winds} + \tau_{xx,waves} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + \frac{M_x - D_x}{H} \dots\dots\dots(3)$$

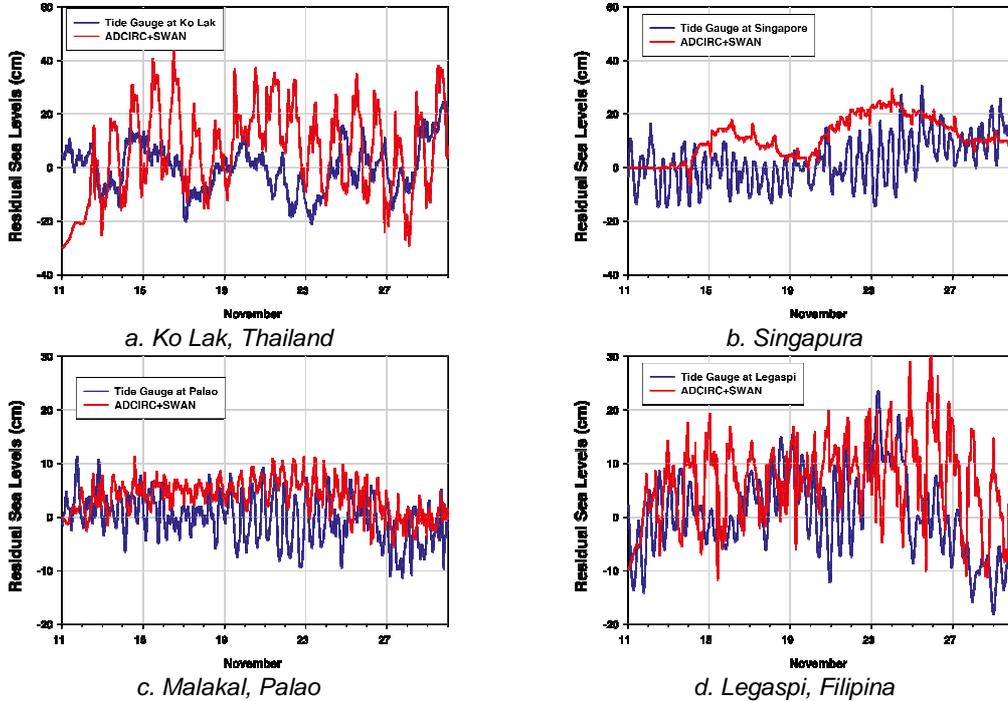
$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[\zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right] + \frac{\tau_{yy,winds} + \tau_{yy,waves} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + \frac{M_y - D_y}{H} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

- $H = \zeta + h$ = total kedalaman
- ζ = deviasi tinggi muka laut dari rata-rata kedalaman
- h = batimetri
- U dan V = vektor kecepatan arus dalam arah x (timur-barat) dan y (utara-selatan) merupakan gaya coriolis
- g = parameter gravitasi
- P_s = tekanan Atmosfer di permukaan
- ρ_0 = referensi densitas air laut
- $\tau_{s,winds}$ = tekanan angin
- $\tau_{s,waves}$ = tekanan gelombang

dengan pengukuran pasang surut. Dari hasil validasi juga terlihat bahwa dampak badai Hagibis, cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan Mitag. Rendahnya RSL di Singapura disebabkan oleh letak stasiun pasut Singapura yang menghadap ke Semenanjung Malaysia, sehingga

energi dan *stress* gelombang tereduksi oleh letak geografis tersebut. Sementara Ko Lak yang terletak di Thailand, relatif jauh dari pusat badai yang terletak di utara Kalimantan, sehingga RSL maksimum hanya 40 cm.



Gambar 4. Time-Series Evolusi RSL Sebelum dan Sesudah Badai Hagibis dan Mitag November 2007

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan tentang evolusi *sea level* pada saat sebelum dan setelah terjadi badai tropis Hagibis berdasarkan pemantauan satelit altimeter serta data pasang surut di Selat Bangka.

Klimatologi Pola dan Kuat Arus

Gambar 5, menunjukkan pola arus dan *sea level* bulanan selama 18 tahun dari tahun 1993 sampai 2010, pada bulan Januari dan Agustus. Pola arus dan estimasi *sea level* merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan

HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM, Bleck 2002). Konfigurasi model untuk laut Jawa, Selat Makassar dan sebagian Laut China Selatan, dapat dilihat di Sofian, *et al.*, 2008.

Gambar 5a menunjukkan pola arus pada bulan Januari saat monsun barat. Propagasi angin barat daya (angin yang bertiup dari barat daya) menyebabkan arus di Laut Jawa mengalir ke timur, dan arus di Selat Karimata ke selatan. Sementara arus di Selat Sunda, mengalir ke timur dan mengalir ke Laut Jawa, dengan membawa massa air dari Samudera Hindia ke Laut Jawa. Sementara itu efek topografi karena menciut dan mendangkalnya kedalaman Selat Kari-

mata sebelah selatan, menyebabkan terjadinya perbedaan *sea level* sebesar 40 cm antara Laut Jawa dan Selat Karimata. Disamping itu, tekanan arus ke timur menyebabkan terjadinya gradien perbedaan *sea level*, dengan merendahnya *sea level* di Laut Jawa dan meningginya *sea level* di Laut Banda, dan pantai utara Pulau Lombok pada bulan Januari.

Di sisi lain, Selat Karimata menyempit dan semakin dangkal di selatan, terutama di sekitar Bangka dan Belitung, menyebabkan arus permukaan di daerah ini menguat dan mencapai 75 cm/detik. Selanjutnya, arus permukaan di Selat Bangka bergerak ke selatan dengan kuat arus rata-rata 20-30 cm/det (**Gambar 5b**).

Pola angin akan berubah seiring dengan perubahan musim. Angin bertiup dari tenggara pada waktu monsun Australia mendorong arus di Laut Jawa menuju ke barat, dan arus di Selat Karimata bergerak ke utara (**Gambar 6a**). Air permukaan di Laut Jawa akan mengalir ke Samudera Hindia melalui Selat Sunda seperti yang terlihat pada **Gambar 6b**. Tekanan angin dan arus ini meluruhkan gradien perbedaan *sea level* di Laut Jawa dan Selat Karimata bagian selatan. Seiring dengan perubahan arah angin, arus permukaan di Laut Jawa dan Selat Karimata masing-masing bergerak ke arah barat dan utara. Arus permukaan di Selat Karimata bervariasi dari kurang dari 5 cm/det sampai lebih dari 30 cm/det di selatan dan utara Selat Karimata.

Karakteristik Pasang Surut

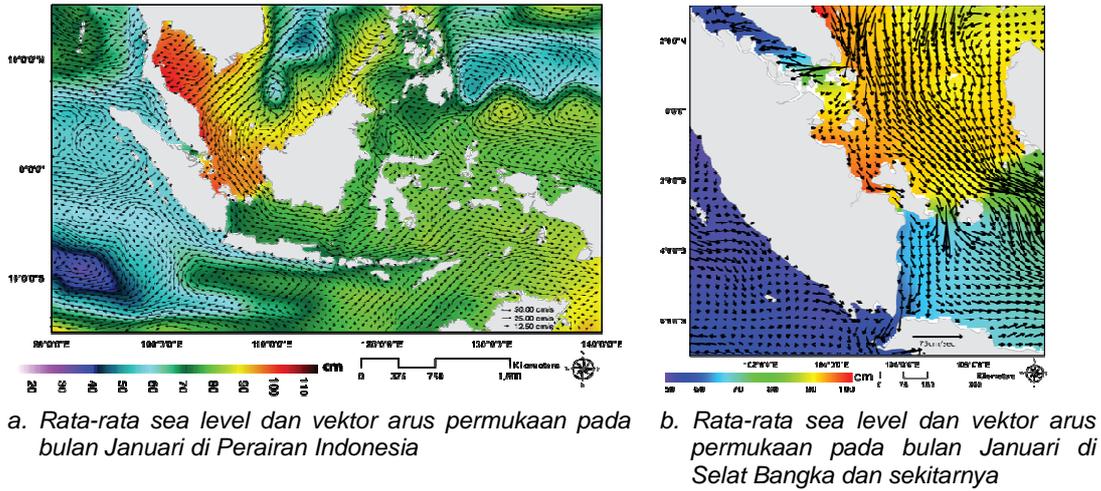
Time-series tinggi pasang surut di pantai timur Sumatera Selatan dan Selat Bangka ditunjukkan pada **Gambar 7**. Tinggi pasang surut dihitung dengan menggunakan HYCOM untuk tahun 1996 sebagai tahun non-ENSO (*El Nino Southern Oscillation*). Secara umum, tunggang pasang surut di Selat Bangka berkisar antara 2.5 s.d. 3.3 m, dengan tunggang pasang surut maksimum terjadi pada bulan Desember sampai Februari.

Tunggang pasang surut terendah terjadi selama April sampai Mei. Peningkatan tinggi tunggang pasang surut terjadi pada bulan Juli sampai Agustus selama puncak monsun Australia, dan menurun pada bulan Oktober. Selanjutnya, tunggang pasang surut mengalami kenaikan dari November sampai Februari, kemudian menurun menuju minimum pada bulan April sampai Mei. Akhirnya, kisaran pasang surut yang tinggi di puncak Monsoon Asia akan meningkatkan risiko banjir akibat curah hujan yang tinggi selama periode ini.

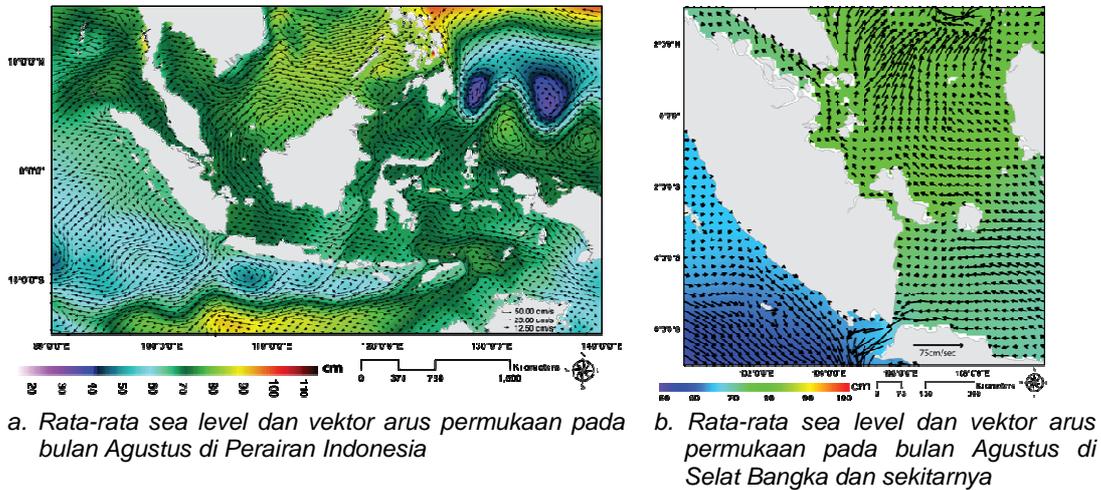
Badai Tropis dan Tinggi Gelombang

Simulasi tinggi gelombang dan muka laut di Perairan Indonesia, termasuk Selat Bangka dilakukan dengan menggunakan ADCIRC digabungkan dengan SWAN. Badai Hagibis dan Mitag serta pengaruhnya terhadap tinggi gelombang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Meskipun kategori badai Hagibis dan Mitag adalah 1 (Yang, 2012), tetapi badai ini mungkin merupakan badai yang terkuat di Perairan Indonesia selama beberapa dekade terakhir.

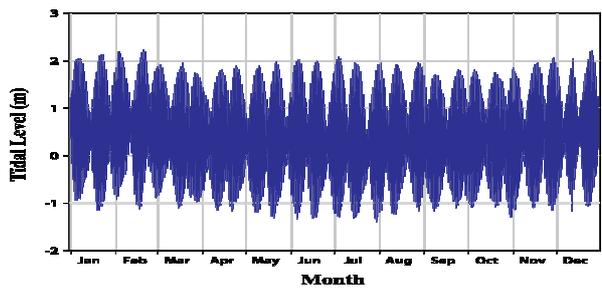
Pada **Gambar 8**, jelas terlihat dua pusat badai, yang terletak di Laut China Selatan (Hagibis) dan timur Kepulauan Filipina yang disebut Badai Mitag. Kedua badai menyebabkan kenaikan gelombang 6 m atau lebih. Pada puncak Hagibis, terjadi pusaran angin yang berlawanan dengan arah jarum jam di utara Pulau Kalimantan dengan kecepatan lebih dari 20 m/det, sedangkan di Laut Jawa, arah angin bergerak dari selatan ke utara dan berbelok ke timur menuju ke selatan Selat Makassar dan selanjutnya berbelok ke utara, dengan kecepatan hingga 10 m/det. Dominasi arah angin di Laut Jawa yang berlawanan arah dengan rambat gelombang dari Laut China Selatan, mengurangi energi gelombang, menyebabkan tinggi gelombang rendah di Laut Jawa, dibandingkan dengan ketinggian gelombang sekitar Pulau Bangka dan Kepulauan Riau.



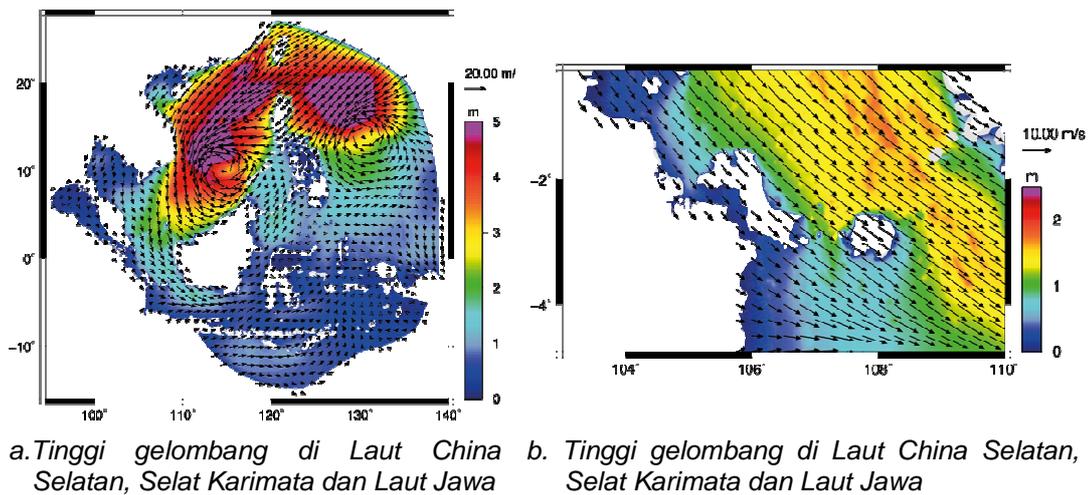
Gambar 5. Pola sea level dan arus permukaan pada bulan Januari di a) Perairan Indonesia dan b) Selat Bangka dan sekitarnya (KLH, 2011)



Gambar 6. Pola sea level dan arus permukaan pada bulan Agustus di a) Perairan Indonesia dan b) Selat Bangka dan sekitarnya (KLH, 2011)



Gambar 7. Tinggi pasang surut di pantai timur Sumatera Selatan dan Selat Bangka hasil estimasi HYCOM tahun 1996



Gambar 8. Kecepatan dan arah angin serta tinggi gelombang pada saat puncak badai Hagibis dan Mitag tanggal 20 Nopember 2007

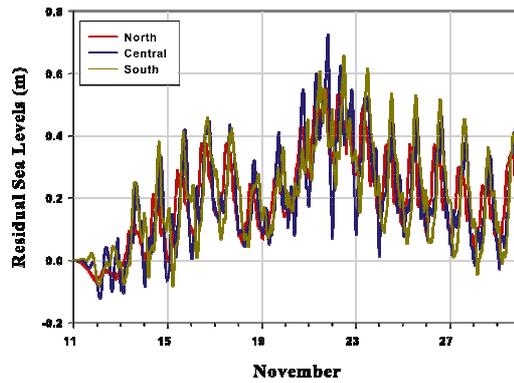
Pengaruh angin musiman dan Hagibis mendorong gelombang bergerak ke selatan, melalui Selat Karimata ke Laut Jawa. Namun demikian, efek dari penyempitan dan pendangkalan Selat Karimata mengurangi tinggi dan energi gelombang, meskipun kecepatan angin lebih dari 10 m/det. Oleh karena itu, tinggi gelombang hanya berkisar antara 10 sd.175 cm di bagian selatan Selat Karimata. Selain itu, tinggi gelombang di Selat Bangka berkisar antara 10 sd. 75 cm. Ketinggian gelombang di bagian utara Selat Bangka lebih tinggi dari tinggi gelombang di bagian tengah dan selatan Selat Bangka. Meskipun tinggi gelombang hanya beberapa puluh sentimeter, namun stres angin dan gelombang laut, perubahan tekanan Atmosfer di permukaan, dan arus permukaan yang kuat dapat menyebabkan kenaikan tinggi muka laut yang ekstrim lebih dari 50 cm.

Kenaikan Tinggi Muka Laut Ekstrim

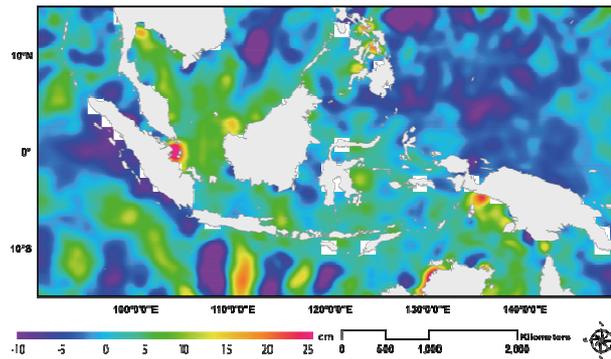
Gambar 9, menunjukkan hasil estimasi model *residual sea level* (RSL) di Selat Bangka bagian utara (105,45°E dan 1,54°S), tengah (105,79°E dan 2,37°S) dan bagian selatan (106,5°E dan 3,34°S).

Secara umum, RSL tinggi di selatan Selat Bangka dan semakin rendah di utara. Namun, selama puncak badai, RSL tertinggi terjadi di Selat Bangka bagian tengah yang mencapai 75 cm. Pada awal Hagibis dan Mitag, RSL rendah sekitar 10 cm, dan menguat seiring dengan penguatan badai. RSL semakin tinggi ketika Hagibis dan Mitag semakin kuat, dan mencapai puncak pada 21 dan 22 November 2007. Selanjutnya kekuatan badai melemah dan bergerak ke utara, RSL menurun, meskipun permukaan air laut masih tinggi di akhir periode badai.

Hasil estimasi RSL relatif sesuai dengan *sea level anomaly* (SLA) yang diamati oleh satelit altimetri seperti yang terlihat pada **Gambar 10**. Meskipun, estimasi altimeter, cenderung lebih rendah dibandingkan dengan hasil model. Hal ini disebabkan karena, SLA adalah hasil interpolasi dari *track altimeter* harian dengan resolusi spasial yang besar sekitar 1°. Dengan kata lain, meskipun altimeter dapat digunakan untuk melihat pola pengaruh badai terhadap karakteristik tinggi muka laut, tapi tidak cukup untuk menentukan tinggi sea level ekstrim akibat badai secara presisi.



Gambar 9. Evolusi perubahan tinggi muka laut akibat badai Hagibis dari tanggal 11 sampai 29 Nopember 2007



Gambar 10. Altimeter sea level anomaly (SLA) pada saat terjadi badai Hagibis tanggal 25 Nopember 2007

Sebagai penutup dengan berpedoman pada pembuatan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang menggunakan *mean sea level* (MSL) sebagai titik 0 m. Pendekatan perhitungan rendaman berdasarkan kenaikan *sea level* akibat badai tropis Hagisbis, pasang surut, SLR dan subsiden, dapat diformulasikan seperti pada **Persamaan 5**.

$$C_t = SSLR * (y_t - y_0) + RSL + CSL + ESLR \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

- C_t = tinggi rob (*coastal flood*)
- $SSLR$ = subsiden dan *sea level rise* yang terukur oleh stasiun pasut
- y_t = tahun prediksi rendaman
- y_0 = tahun akuisisi data DTM yang digunakan

- RSL = nilai pasang tertinggi relatif terhadap rata-rata harian sebesar 160 cm pada November sampai Februari
- CSL = klimatologi *sea level* sebesar 10 cm pada Januari sampai Februari
- $ESLR$ = kenaikan *sea level* ekstrim karena faktor meteorologis seperti badai Hagibis sebesar 70 cm

KESIMPULAN

Risiko tertinggi banjir rob di Pulau Bangka terjadi pada bulan November sampai Februari.

Badai Hagibis dapat menyebabkan kenaikan *sea level* di Jakarta sebesar

70 cm, dan mempertinggi risiko banjir rob, dan berisiko terhadap kerentanan bangunan PLTN yang mungkin dibangun di daerah pesisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlas R., Ardizzone J., Hoffman R.N. 2008. Application of satellite surface wind data to ocean wind analysis, *Proc. SPIE*, Vol. 7087, 70870B (2008); DOI:10.1117/12.795371.
- Atlas R., Hoffman R. N., Ardizzone J., Leidner S. M., Jusem J. C. 2009. Development of a new cross-calibrated, multi-platform (CCMP) ocean surface wind product. *AMS 13th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS)*.
- Bleck, R. 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. *Ocean Modelling*. 4, 55-88.
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 104, 7649–7666.
- Dietrich, J. C., M. Zijlema, J.J. Westerink, L.H. Holthuijsen, C. Dawson, R.A. Luettich Jr., R.E. Jensen, J.M. Smith, G.S. Stelling, G.W. Stone. 2011. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*. Vol. 58, 46-68.
- Egbert, G. D and S. Y. Erofeeva. 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *American Meteorological Society*. 19, 183-204.
- Elsner, J. B., J. P. Kossin, and T. H. Jagger. 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*. 455, 92-95.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. 2002. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1631-1643.
- KLH. 2011. Mainstreaming Adaptasi Perubahan Iklim di Provinsi Sumatera Selatan. Basis sains. Proyeksi Sea Level Rise.
- Rogers, W.E., Hwang, P.A., Wang, D.W. 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*. 33. 366–389.
- Sofian, I, Kozai, K, and Ohsawa, T. 2008. Investigation on the relationship between wind-induced volume transport and mean sea level in the Java Sea using an oceanic general circulation model. *Journal of Marine and Meteorological Society of Japan*. Vol. 84. Umitosora.
- Timmermann, A., M. Latif, A. Bacher, J. Oberhuber, E. Roeckner. 1999. Increased El-Niño. *Nature*. 398. 694-696.
- Timmermann, A., 2001, Changes of ENSO stability due to Greenhouse Warming. *Geophysical Research Letters*. 28. 8: 2064-2066.
- Torrence, C. and G. P. Compo. 1999. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79. 1: 61–78.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H. R. Chang. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*. 309. 1844-1846.
- Westerink, J.J., Luettich, R.A., Feyen, J.C., Atkinson, J.H., Dawson, C. and Roberts, H.J., 2008. A basin to channel scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana. *Monthly Weather Review*. 136 (3), 833–864.
- Yang, Y., L. Sun, A. Duan, Y. Li, Y. Fu, Y. Yan, Z. Wang and T. Xian. 2012. Impacts of the binary typhoons on upper ocean environments in November 2007. *J. Appl. Remote Sens*. 6(1), 063583.