

SIMULASI GELOMBANG EKSTRIM AKIBAT SWELL DI INDONESIA MENGUNAKAN MODEL WAVEWATCH-III

THE SIMULATION OF EXTREME WAVE DUE TO SWELL IN INDONESIA USING WAVEWATCH-III

Muhammad Najib Habibie^{1*}, Donald Sukma Permana², Suratno³

^{1,2,3}Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta
E-mail: najib.habibie@bmk.go.id

Naskah masuk: 22 Mei 2013; Naskah diperbaiki: 13 Desember 2013; Naskah diterima: 24 Desember 2013

ABSTRAK

Posisi Indonesia yang diapit Samudera Hindia dan Pasifik, menyebabkan wilayah ini rawan terhadap ancaman gelombang tinggi yang berasal dari kedua samudera. Salah satu keadaan ekstrim terjadi pada tanggal 17-19 Mei 2007 yang menyebabkan kerusakan infrastruktur di beberapa tempat sepanjang pantai barat Sumatera hingga selatan Nusa Tenggara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan model gelombang WAVEWATCH-III dalam mensimulasikan kejadian ini. Simulasi model dilakukan menggunakan input angin *Global Forecasting System* (GFS) dan batimetri *US Geological Survey* (USGS). Hasil simulasi diverifikasi menggunakan data ERA-Interim serta catatan media massa. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa kejadian gelombang ekstrim tanggal 17-19 Mei 2007 dipicu oleh adanya badai di Tanjung Harapan selatan Afrika. Siklon ini menyebabkan angin bertiup persisten dengan kecepatan lebih dari 22 m/s ke arah Indonesia yang berlangsung selama tanggal 9-14 Mei. Hal ini menimbulkan gelombang ekstrim dengan tinggi lebih dari 3 meter dipantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, Nusa Tenggara sampai dengan Flores. Gelombang ini merupakan *swell* yang dibentuk oleh angin persisten tersebut dan melintasi Samudera Hindia menuju Indonesia. Verifikasi simulasi model WAVEWATCH-III berdasarkan tempat dan waktu kejadiannya menggunakan data *reanalysis* ERA-Interim menunjukkan korelasi sebesar 0,92-0,97 dan nilai MAE 0,13-0,45 m. Periode gelombang di daerah pantai yang tercatat berdasar simulasi ini adalah 20 detik. Panjang gelombang ratusan meter ini ketika menghantam pantai mengalami *wave setup* akibat gesekan dengan dasar laut sehingga menjadikan gelombang ini bersifat merusak. Selain itu pada saat gelombang ekstrim terjadi, bertepatan dengan puncak pasang surut yang menyebabkan superposisi antara *swell* dan pasang surut dan menambah ketinggian *swell*.

Kata kunci: gelombang ekstrim, *swell*, WAVEWATCH-III, periode gelombang

ABSTRACT

Indonesia lies between Hindia and Pacific ocean, it caused high risk in extreme wave from both of them. One of extreme wave events occurred on May 17-19, 2007. This event damaged many infrastructure over western coast of Sumatra until southern Nusa Tenggara. The purpose of this research is to investigate WAVEWATCH-III performance to simulate the extreme wave in Indonesia waters. 10 m of wind from Global Forecasting System (GFS) and bathymetry from US Geological Survey (USGS) used as input model to simulate the wind wave on global and regional domain during May 1-31, 2007, and then verified by ERA-Interim data. The simulation shown that these extreme wave event triggered by tropical cyclone in Cape of Hope, southern of Africa. The cyclone caused persistent wind more than 22 m/s speed and leads to Indonesia waters. This condition took place during May 4-10, 2007 and generated extreme wave more than 3 meter over the western coast of Sumatra, the southern coast of Java to Flores. The extreme wave considered as swell. The persistent wind generated wind sea and grown to swell leads to Indonesia waters across Hindian Ocean. The model has been verified by ERA-Interim reanalysis data, it has a good correlation (0,92-0,97) and MAE between 0,13-0,45 m. But the model data higher than ERA-Interim because the resolution of the model higher too. Based on the simulation, more than 20 seconds wave period recorded in coastal areas. This hundreds meters of wavelength having setup due to bottom friction, so these wave are destructive and dangerous. These event resembling with spring tide, so superposition about swell and tide caused wave setup.

Keywords : extreme wave, *swell*, WAVEWATCH-III, wave period

1. Pendahuluan

Pengetahuan atas karakteristik gelombang sangatlah penting bagi banyak bidang kemaritiman seperti keselamatan pelayaran, industri lepas pantai, pengembangan wilayah pantai, pertahanan dan desain kapal [1,2,3]. Sebagai negara maritim yang berada diantara dua samudera, Indonesia mempunyai tingkat kerawanan yang tinggi terhadap gelombang tinggi [4]. Gelombang ekstrim atau gelombang tinggi, bertanggungjawab atas banyak kecelakaan laut. Biasanya hal ini berkaitan dengan kondisi siklon tropis dimana tinggi gelombang sangat tinggi. Kejadian gelombang tinggi ini biasanya sangat sedikit tandatangananya dan dapat terjadi secara acak baik tempat maupun waktunya [5].

Gelombang ekstrim dapat ditinjau dari sisi statistik maupun akibat yang ditimbulkannya. Dari sisi statistik kejadian ekstrim biasanya jarang terjadi, tetapi akibat yang ditimbulkan sangat besar bagi lingkungan [6]. Kejadian ekstrim tidak hanya dipelajari sebagai masalah statistik dengan penekanan pada masalah frekuensi dan besaran kejadiannya, tetapi juga harus diselidiki mengenai mekanisme dan dinamika yang mendasarinya.

Gelombang yang besar adalah materi yang menjadi pusat perhatian bagi pelaut, perancang kapal dan juga arsitek bangunan lepas pantai seperti platform pengeboran minyak [7]. Pada banyak situasi, semua gelombang besar di laut menjadi perhatian utama, termasuk tsunami yang diakibatkan oleh aktivitas tektonik, tetapi pada penelitian ini hanya difokuskan pada *wind wave* atau gelombang yang dibentuk oleh angin.

Simulasi dan prediksi gelombang ekstrim menjadi isu penting pada saat ini karena meningkatnya potensi ancaman kerusakan bagi kehidupan manusia dan infrastruktur sosial [8]. Meningkatnya populasi dan berkembangnya wilayah pantai untuk berbagai kepentingan dewasa ini menambah pentingnya informasi tentang gelombang ekstrim ini. Salah satu kejadian yang pernah tercatat di Indonesia yaitu gelombang tinggi tanggal 17-19 Mei 2007 yang menghantam pantai barat Sumatera, selatan Jawa sampai Flores. Kejadian ini mengakibatkan banyak kerusakan infrastruktur yang sangat besar serta menyebabkan ribuan penduduk di daerah terimbas mengungsi menuju daerah yang lebih aman. Kejadian ini tidak tersimulasikan dengan baik ke dua sehingga masyarakat tidak memperoleh peringatan dini.

Model gelombang menjadi komponen utama dalam memberikan informasi prediksi gelombang dewasa ini. Hal ini terjadi akibat terbatasnya pengamatan in-situ yang dilakukan untuk mengamati lautan secara umum. Berdasarkan ketentuan WMO-No.702 [9], untuk keperluan informasi gelombang, data dapat diperoleh dari dua sumber utama yaitu: (a) hasil pengukuran dan observasi, dan (b) hasil estimasi berdasarkan data angin (*wave hindcast*). Data hasil pengukuran dan observasi di lautan umumnya sangat

terbatas dan tidak kontinyu. Untuk itu penggunaan model bukanlah menjadi masalah yang tabu.

Pada sejarahnya, model gelombang telah mengalami perkembangan dan penyempurnaan. Dimulai dari pembangunan model gelombang generasi pertama dimana model ini hanya memperhitungkan linear input dan peluruhan energi sebagai komponen utamanya tanpa memperhitungkan gelombang nonlinear. Kemudian dikembangkan model generasi kedua dimana pada model ini transfer gelombang nonlinear telah diperhitungkan dengan parameterisasi secara sederhana. Sedangkan untuk disipasi telah diperhitungkan gesekan dengan dasar laut serta *white capping*. Model generasi kedua dibedakan menjadi '*coupled hybrid*', dan '*coupled discrete*'. Dalam model '*coupled hybrid*' spektrum *wind sea* yang dikontrol oleh interaksi nonlinier, diasumsikan untuk menyesuaikan dengan cepat ke bentuk quasi-equilibrium universal yang merupakan parameter skala tunggal - biasanya energi *wind sea* -atau paling tidak parameter skala frekuensi kedua perlu diprediksi perlahan-lahan sesuai parameters yang lain. *Swell* yang tidak dipengaruhi oleh interaksi nonlinier, kemudian diperlakukan sebagai superposisi komponen independen dengan cara yang sama seperti pada model generasi pertama. Model '*coupled discrete*' mempertahankan representasi diskrit spektral tradisional, tetapi memiliki parametrisasi transfer nonlinear dengan validitas terbatas, sehingga potensi kelebihan dari representasi yang lebih fleksibel dari spektrum *wind sea* dan representasi keseragaman transisi *swell-wind sea* tidak dapat dimanfaatkan dengan baik [10].

Model generasi ketiga merupakan penyempurnaan dari model gelombang sebelumnya dimana model ini merupakan sebuah model spektral lengkap dengan representasi eksplisit pada proses fisik yang relevan terhadap evolusi gelombang dan memberikan gambaran dua dimensi dari laut secara lengkap. Salah satu model generasi ketiga ini adalah WAVEWATCH-III. Model ini dikembangkan oleh *Marine Modelling and Analysis Branch (MMAB)* pada *Environmental Modelling Center (EMC) National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* dan didistribusikan secara *online* melalui <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>[11].

Model WAVEWATCH-III pernah digunakan untuk mensimulasikan klimatologi tinggi gelombang signifikan di wilayah Indonesia dari tahun 2000-2008. Hasil simulasi menunjukkan adanya nilai korelasi yang tinggi (0,77-0,94) ketika dibandingkan dengan data satelit altimetry QuickScat [12]. Atas dasar inilah maka WAVEWATCH-III dipilih untuk mensimulasikan gelombang ekstrim di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan model WAVEWATCH-III dalam mensimulasikan gelombang ekstrim yang pernah terjadi di perairan Indonesia. Komponen yang dianalisa adalah tinggi gelombang dan waktu kejadiannya.

2. Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam menjalankan model WAVEWATCH-III adalah (1) data angin 10 m Final Analyses (FNL) per 6 jam dari GFS (*Global Forecasting System*), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) – NOAA. Resolusi spasial datanya adalah $1^\circ (\approx 111 \text{ km})$. Data di *download* melalui website <http://www.mmm.ucar.edu/> [13] dengan panjang data selama bulan April dan Mei 2007. (2) data batimetri etopo resolusi $2' (\approx 3 \times 3 \text{ km})$ dari *US Geological Survey* (USGS), website <http://www.usgs.gov/> [12]. Data reanalisis ERA-Interim digunakan sebagai pembanding data model, resolusinya $0,75^\circ$ dan dapat diakses melalui website http://data-portal.ecmwf.int/data/d/license/interim_full/ dengan panjang data sebulan (Mei 2007) [14]. Untuk pendukung analisa tinggi gelombang dipantai digunakan data pasang surut bulan Mei 2007 untuk wilayah Aceh, Bengkulu, Cilacap dan Bali yang diperoleh dari Dinas Hidro Oseanografi (DISHIDROS).

Persamaan yang digunakan dalam membangun model WAVEWATCH-III adalah sebagai berikut:

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{xx\dots} \quad (1)$$

dimana di laut dalam terdiri dari tiga komponen yaitu S_{in} yang mewakili input energi dari angin, S_{nl} adalah interaksi gelombang non linear dan S_{ds} mewakili disipasi energi gelombang yang pecah akibat tegangan permukaan tidak bisa menahan gelombang atau sering disebut sebagai '*white capping*'. Di laut dangkal proses tambahan yang diperhitungkan meliputi interaksi gelombang dengan dasar laut S_{bot} , dan pada kondisi ekstrim sangat dangkal ditambah dengan *depth-induced breaking* atau kedalaman dimana menyebabkan gelombang pecah yang disimbolkan oleh S_{db} serta S_{tr} yaitu interaksi gelombang triad [15]. Daerah dimana terjadi gelombang pecah (*surf breaking*) ini biasanya berada dipantai dan digunakan sebagai tempat berselancar.

Model dijalankan pada dua domain yaitu domain global ($180^\circ \text{ BB} - 180^\circ \text{ BT}; 70^\circ \text{ LS} - 70^\circ \text{ LU}$) dengan resolusi spasial $0,5^\circ (\sim 55 \text{ km})$ dan domain regional Indonesia ($90^\circ \text{ BT} - 150^\circ \text{ BT}; 15^\circ \text{ LS} - 15^\circ \text{ LU}$) dengan resolusi spasial $0,25^\circ (\sim 27 \text{ km})$. Model dijalankan dengan metode *two way nesting* dimana pada daerah *boundary* kedua domain baik global maupun regional dapat saling mempengaruhi. Untuk perhitungan numerik, model dijalankan di *High Performance Computing* (HPC) dengan 24 prosesor di Puslitbang BMKG. *Spin-up* model dilakukan selama dua minggu dari kondisi *calm*, jadi pada 2 minggu pertama hasil perhitungan numerik yang dilakukan belum dianalisa dan hanya sebagai input energi sampai model dianggap stabil.

Seting model yang diaplikasikan pada simulasi ini adalah sebagai berikut, pada komponen diskret spektrum, arah yang digunakan meliputi 24 arah

dengan penambahan arah sebesar 15° dan diawali dari arah 0° . Jumlah frekuensi yang diperhitungkan adalah 25 dan rentang yang diperhitungkan antara 0,0412-0,4056 Hz.

Parameter yang digunakan dalam model ini masih berdasarkan seting bawaan model (*default*). Perhitungan linear input menggunakan perhitungan berdasarkan penelitian Cavaleri dan Malanotte-Rizzoli [16], input angin berdasar Tolman dan Chalikov [17], interaksi gelombang nonlinear dihitung dengan *Discrete Interaction Approximation* (DIA), sedangkan untuk memperhitungkan peluruhan energi (*dissipation*) berdasarkan ketentuan Tolman dan Chalikov [16]. Perhitungan gesekan dasar laut (*bottom friction*) berdasarkan *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP), 1973, sedangkan untuk gelombang pecah (*surf breaking*) diperhitungkan berdasar penelitian Betjess dan Jenjens [18].

Untuk mensimulasikan gelombang ekstrim pada tanggal 17-19 Mei 2007 model dijalankan selama pertengahan April sampai akhir bulan Mei. Simulasi pada bulan April dianggap sebagai *spin-up*, sedangkan data yang dianalisa adalah bulan Mei. Untuk mengetahui fluktuasi tinggi gelombang pada saat kejadian, diambil data pada sepuluh titik yaitu Aceh, Padang, Bengkulu, Lampung, Pelabuhan Ratu, Sukabumi, Cilacap, Jogjakarta, Bali dan Flores. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan data ERA-Interim dihitung nilai korelasi serta *Mean Absolut Error* (MAE).

3. Hasil dan Pembahasan

Salah satu kondisi ekstrim yang pernah terjadi di perairan Indonesia adalah kejadian gelombang tinggi tanggal 17-19 Mei 2007. Dimana kejadian ini mengakibatkan adanya gelombang tinggi antara 3-6 meter di sepanjang pantai barat Sumatera, selatan Jawa hingga selatan Nusa Tenggara seperti terlihat pada Gambar 1. Gelombang dengan tinggi 2-6 m ini 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 [19] dan pada tanggal 19 Mei 2007 gelombang ini menjalar ke Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur.



Gambar 1. Peta daerah terimbas gelombang tinggi pada kejadian tanggal 17-19 Juli 2007. (Sumber: Satgas Penanggulangan Bencana Pusat Dep. PU)

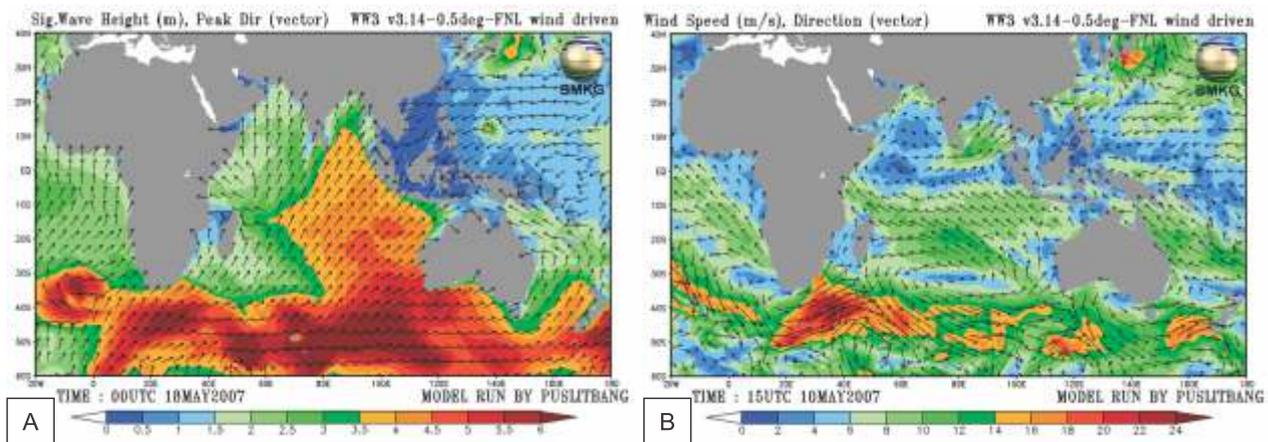
Terjangan gelombang di sepanjang garis pantai daerah tersebut mengakibatkan pula lumpuhnya aktivitas kepariwisataan, rusaknya perahu nelayan, dan ribuan warga mengungsi ke kawasan yang aman.

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 [19]. 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 [20]. Pada penelitian ini difokuskan pada simulasi gelombang yang dibangkitkan dari energi angin (*wind wave*).

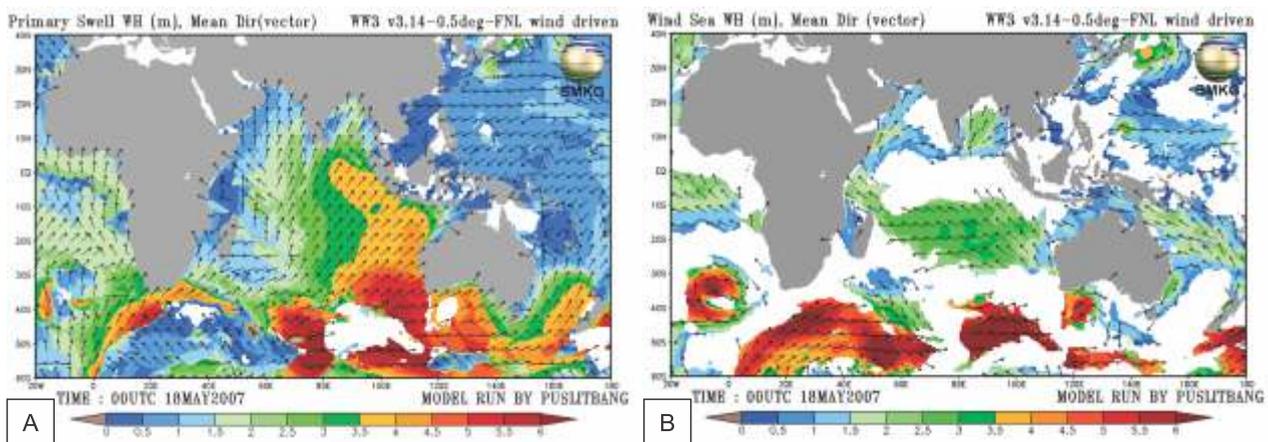
Pada kejadian tersebut disepanjang pantai barat Sumatera sampai Nusa Tenggara terjadi gelombang tinggi yang menurut Satgas Penanggulangan Bencana Pusat Dep. PU mengakibatkan kerugian yang sangat besar terutama rusaknya infrastruktur disepanjang pantai, meliputi permukiman serta jalan dan juga rusaknya beberapa kapal. Walaupun tidak mengakibatkan korban jiwa tetapi kejadian ini menimbulkan kerugian materi yang sangat banyak. Gelombang tinggi sudah mulai terlihat menghantam pantai barat Sumatera pada tanggal 17 Mei 2007. Gelombang ini dipicu oleh adanya badai tanggal 9 Mei 2007 di Tanjung Harapan, selatan Afrika, dan pada tanggal 10 Mei 2007 terlihat adanya gelombang signifikan dengan tinggi >6 meter di daerah tersebut yang mengarah ke Samudera Hindia. Pada tanggal 12 Mei gelombang tersebut sudah mencapai Madagaskar, sedangkan di Tanjung Harapan gelombang dengan tinggi lebih dari 6 meter masih terlihat dengan arah

yang sama. Hal ini berlangsung sampai tanggal 13 Mei dan pada tanggal 14 Mei gelombang tinggi tersebut meninggalkan Tanjung Harapan dan menjangar mengarah ke wilayah Indonesia. Gelombang dengan tinggi lebih dari 2,5 meter sudah mulai menerjang pantai barat Sumatera pada tanggal 17 Mei dan pada tanggal 18 Mei gelombang dengan tinggi lebih dari 4 meter sampai ke pantai barat Sumatera. Simulasi gelombang secara global pada saat kejadian tersebut terlihat seperti Gambar 2a.

Kejadian gelombang tinggi ini berhubungan dengan kondisi angin yang bertiup di Samudera Hindia. Mulai tanggal 9-14 Mei 2007, angin bertiup secara persisten di wilayah Tanjung Harapan, selatan Afrika dengan kecepatan lebih dari 22 m/s dan mengarah ke Samudera Hindia (Gambar 2b). Angin yang kencang dan mempunyai arah yang tetap ini menyebabkan terbentuknya gelombang *windsea* yang kemudian berkembang menjadi *fully developed sea* atau *swell*. *Swell* ini merupakan *wind sea* yang karena energinya besar maka akan terlepas dari daerah pembentukannya, dan ini dikelompokkan dalam gelombang nonlinier. Salah satu ciri-ciri *swell* adalah arah gelombangnya pada umumnya tidak sesuai dengan arah angin lokal. *Swell* umumnya terjadi di laut lepas, dan dapat mencapai jarak yang sangat jauh dari daerah pembentukannya dengan sedikit pembelokan arah [21]. Karena pada kasus ini arah angin persisten menuju wilayah Indonesia, maka *swell* yang terbentuk menuju ke wilayah tersebut dan setelah melintasi Samudera Hindia dalam beberapa hari maka gelombang tinggi tersebut mencapai pantai barat Sumatera dan wilayah lain.



Gambar 2. Tinggi gelombang signifikan (a) dan arah serta kecepatan angin (b).



Gambar 3. Tinggi swell (a) dan wind sea (b) global tanggal 18 Mei 2007.

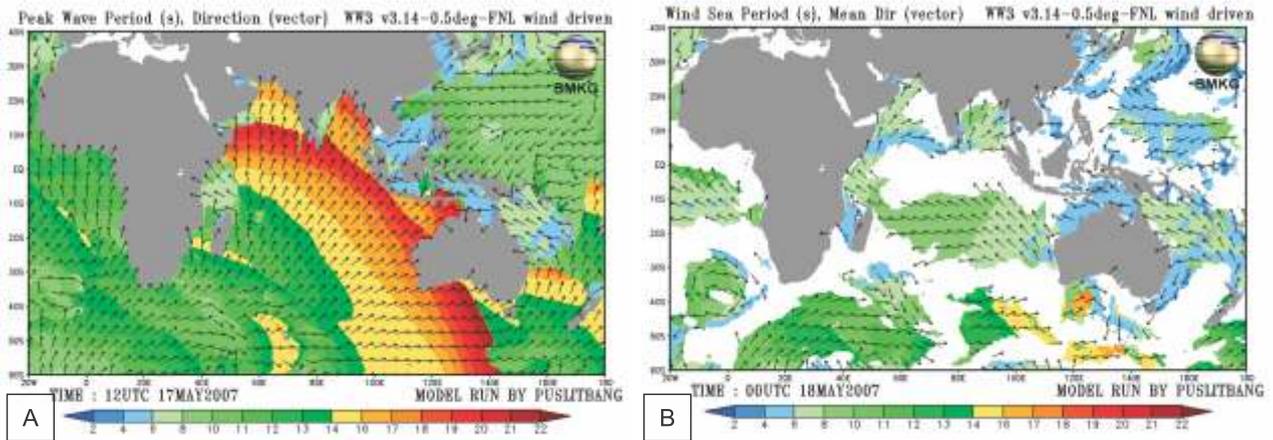
Model gelombang generasi ketiga mempunyai kemampuan untuk memperhitungkan gelombang nonlinier secara eksplisit, artinya perhitungan gelombang ini telah dilakukan secara langsung bukan melalui pendekatan ataupun parameterisasi. Hal ini juga terlihat dari hasil simulasi gelombang secara global yang menunjukkan bahwa simulasi *swell* sudah merepresentasikan kondisi sebenarnya.

Gelombang signifikan merupakan rerata dari 1/3 gelombang tertinggi dalam periode waktu tertentu. Pada simulasi ini didapatkan nilai tinggi gelombang signifikan yang tinggi di Samudera Indonesia. Gelombang ini merupakan gabungan antara *swell* dan *wind sea*. Untuk mendeteksi jenis gelombang yang dominan pada kejadian gelombang tinggi tersebut, dilakukan pemisahan antara *swell* dan *wind sea* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

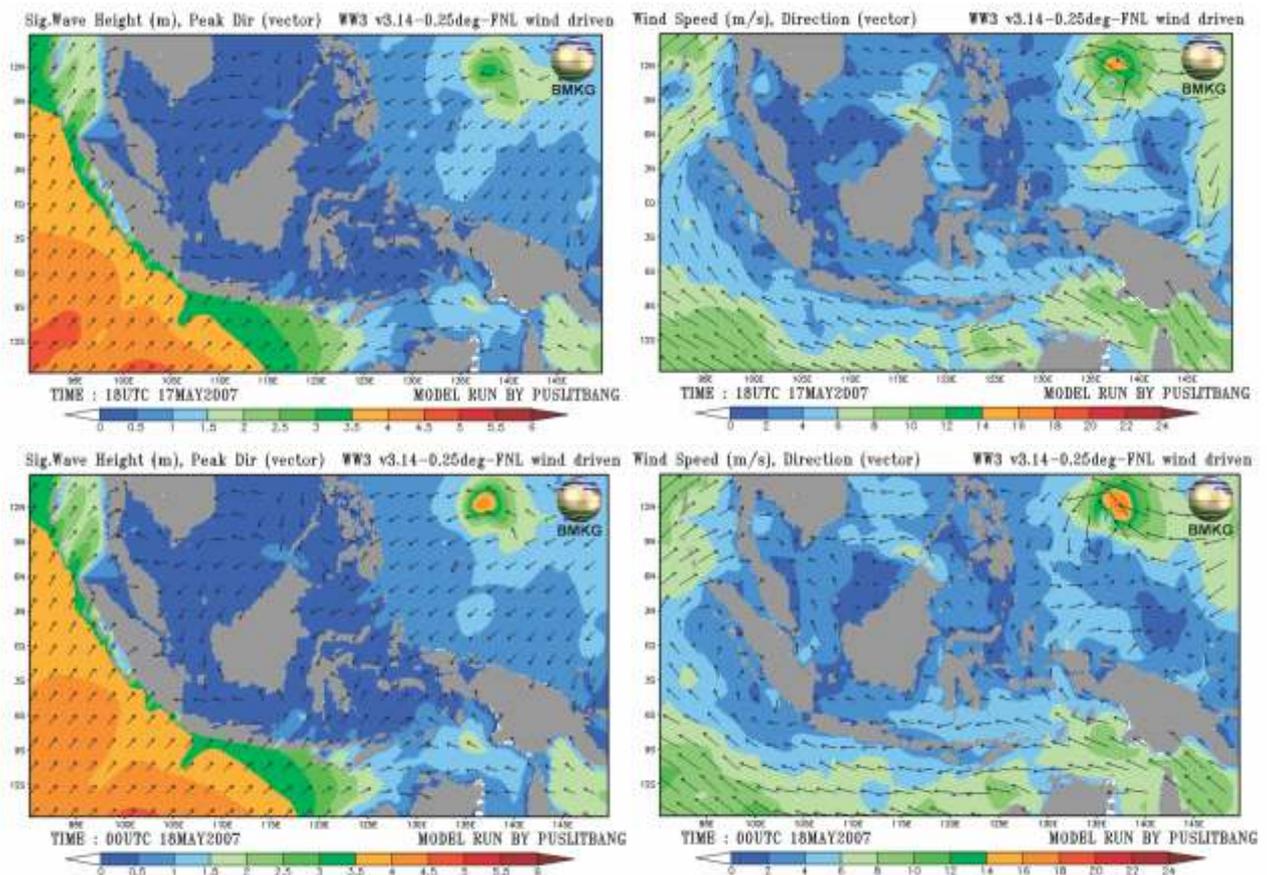
Swell mulai terbentuk di sekitar Tanjung Harapan pada tanggal 10 Mei dan karena angin bertiup kencang secara persisten sampai tanggal 14 Mei, maka *swell* berkembang menjadi lebih besar dan menjaral

melintasi Samudera Hindia dan mencapai wilayah Indonesia tanggal 17 Mei. Hasil simulasi menunjukkan pada tanggal 14-16 Mei 2007 tinggi gelombang Samudera Hindia didominasi oleh *swell* dengan tinggi lebih dari 6 meter. Dan semakin hari, mendekati wilayah Indonesia yang menyebabkan gelombang yang besar dan merusak.

Wind sea dengan tinggi lebih dari 6 meter juga terbentuk pada tanggal 10-14 Mei 2007 di sebelah selatan Afrika dan bergerak ke timur mendekati Madagaskar. Arah dari *wind sea* ini menuju Samudera Hindia sesuai dengan arah *swell* yang terbentuk. Tetapi penjaralan *wind sea* ini tidak sampai melintasi Samudera Hindia. Pada saat terjadi gelombang di wilayah Indonesia tanggal 17-19 Mei 2007, tinggi *swell* di Samudera Hindia umumnya lebih besar dibandingkan dengan *wind sea*, dimana *swell* di Samudera Hindia bagian tengah mempunyai tinggi sekitar 4 m, sedangkan *wind sea* ketinggiannya sekitar 2,5 m, hal ini menunjukkan bahwa kejadian tersebut disebabkan oleh *swell*.



Gambar 4. Peak period (A) dan wind sea (B) gelombang global pada tanggal 17 Mei 2007



Gambar 5. Peta tinggi gelombang dan kondisi angin permukaan 17 Mei 2007 dengan simulasi WAVEWATCH-III

Gelombang yang disimulasikan oleh model WAVEWATCH-III pada saat kejadian umumnya memiliki periode 20 detik seperti terlihat pada Gambar 4. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang yang ada merupakan gelombang panjang. Dengan melihat periode gelombang yang ada bisa diestimasi panjang gelombangnya, dari perhitungan ini panjang gelombang yang terbentuk sekitar 625 meter. Tentunya gelombang ini ketika bergesekan dengan dasar laut akan mengalami peningkatan tinggi gelombang. Sehingga tinggi gelombang di pantai akan menjadi besar.

Periode gelombang yang tersimulasikan oleh WAVEWATCH-III berubah dari tanggal 10-19 Mei 2007. Evolusi perubahan ini lebih mengikuti pola perubahan *swell* dibandingkan periode *wind sea* seperti terlihat pada Gambar 4. Hal ini menunjukkan bahwa tinggi gelombang signifikan pada saat itu lebih dipengaruhi oleh *swell* daripada *wind sea*.

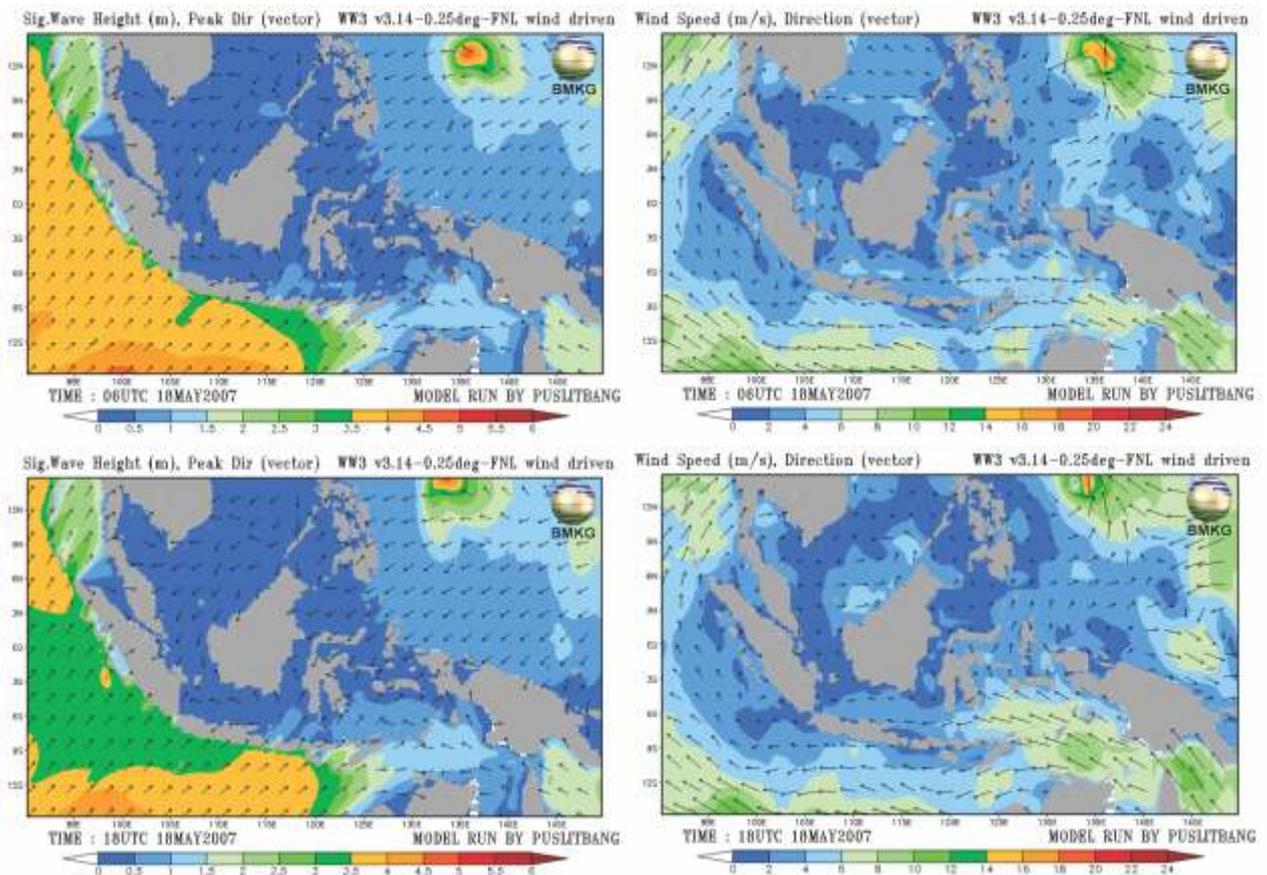
Kondisi laut pada tanggal 17 Mei 2007 umumnya mempunyai gelombang signifikan yang tinggi seperti terlihat pada Gambar 5. Samudera Hindia dan laut di selatan Afrika mempunyai tinggi gelombang signifikan antara 4-6 meter dan mengarah ke wilayah

Indonesia. Kondisi ini merupakan akibat dari akumulasi kejadian siklon tropis di selatan Afrika yang berlangsung beberapa hari. *Swell* yang diakibatkan oleh siklon ini merambat ke arah timur dan akhirnya sampai ke perairan Indonesia pada tanggal 17-19 Mei 2007. Kondisi angin pada saat kejadian tersebut di wilayah Indonesia umumnya adalah *calm*.

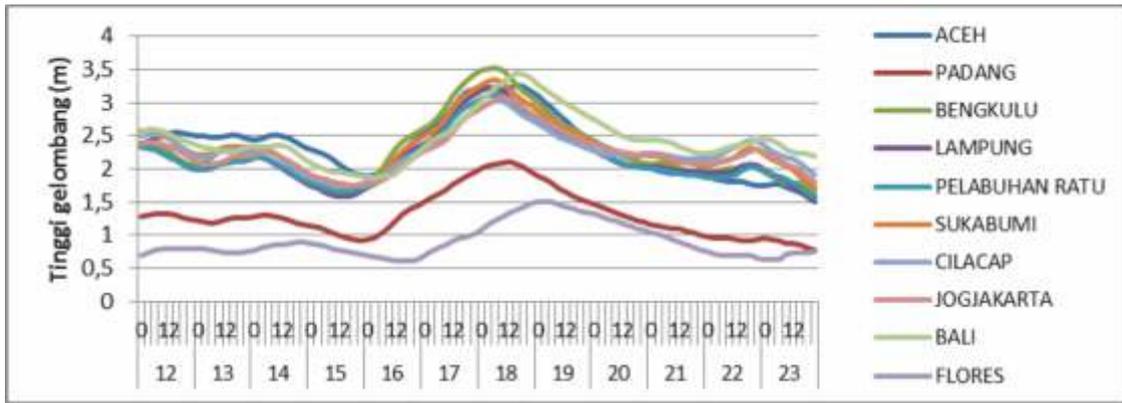
Menurut berita dari media massa pada tanggal 17 Mei 2007 malam sekitar pukul 21.00 WIB gelombang tinggi mulai menghantam pantai barat Sumatera dengan ketinggian 3-4 meter. Kejadian ini dapat disimulasikan dengan baik oleh model WAVEWATCH-III pada waktu yang sama. Dari simulasi ini didapatkan arah gelombang yang berbeda dengan arah anginnya, hal ini mengindikasikan bahwa gelombang tinggi yang terjadi bukan disebabkan oleh angin lokal, apabila disebabkan angin lokal maka arah gelombangnya cenderung sama dengan arah gelombangnya. Gelombang tinggi di pantai barat Sumatera ini bertahan sampai tanggal 18 Mei dan kemudian merambat ke timur menyusuri pantai

selatan Jawa seperti terlihat pada Gambar 6. Gelombang tinggi di pantai barat Sumatera ini mengakibatkan kerusakan di Kabupaten Aceh Barat, Pasaman Barat dan Padang Pariaman dengan korban mengungsi lebih dari 5000 jiwa, ratusan bangunan dan fasilitas umum rusak.

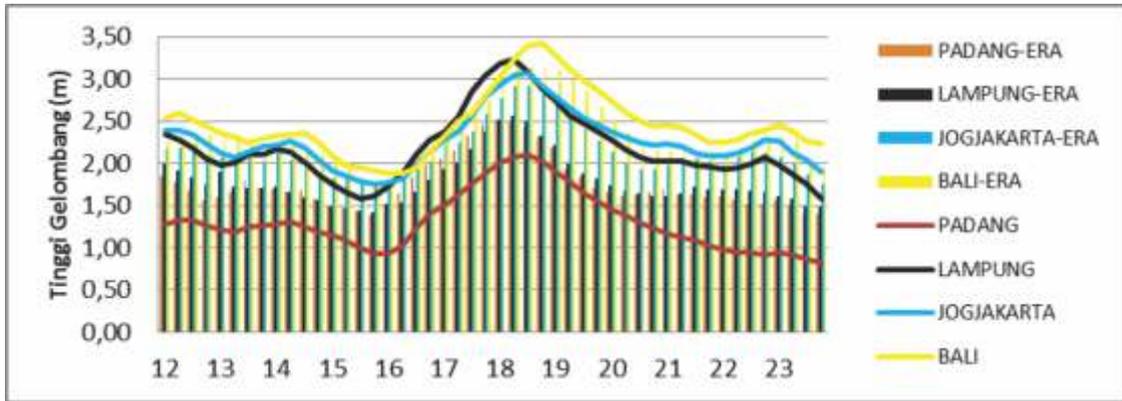
Pada tanggal 18 Mei gelombang tinggi mulai merambat ke pantai selatan Jawa dengan ketinggian sekitar 3,5 m. Hal ini menyebabkan banyak kerusakan diantaranya di 61 rumah dan ratusan warung di Pelabuhan Ratu, serta di Garut, Tasikmalaya dan Ciamis dengan kerusakan rumah dan perahu. Peristiwa ini menyebabkan korban luka dan lebih dari 1.400 warga mengungsi. Pada tanggal 19 Mei gelombang tinggi mencapai pesisir selatan Nusa Tenggara dan kemudian meluruh pada tanggal 20 Mei 2007. Kejadian ini sangat langka terjadi di Indonesia tetapi bersifat merusak, banyak ahli menyebut kejadian seperti ini sebagai Meteotsunami yaitu gelombang besar seperti tsunami yang diakibatkan oleh faktor meteorologi.



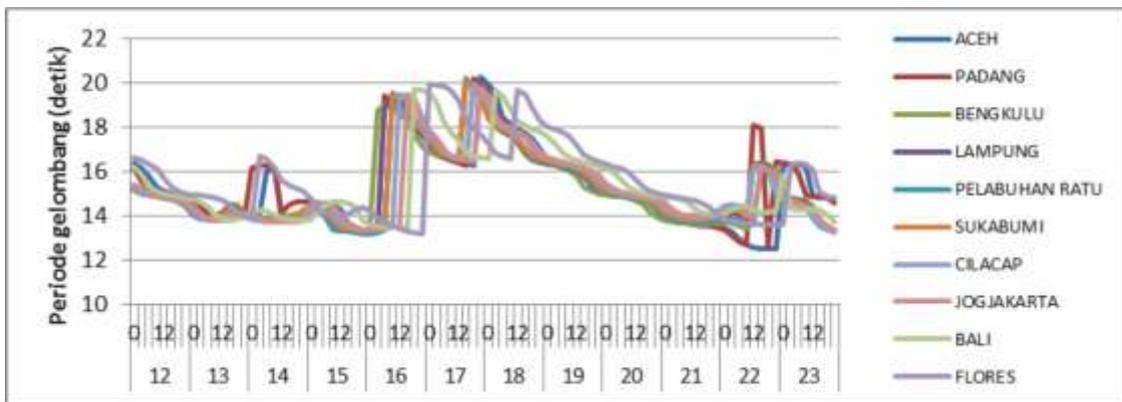
Gambar 6. Peta tinggi gelombang dan kondisi angin permukaan 18 Mei 2007 dengan simulasi WAVEWATCH-III



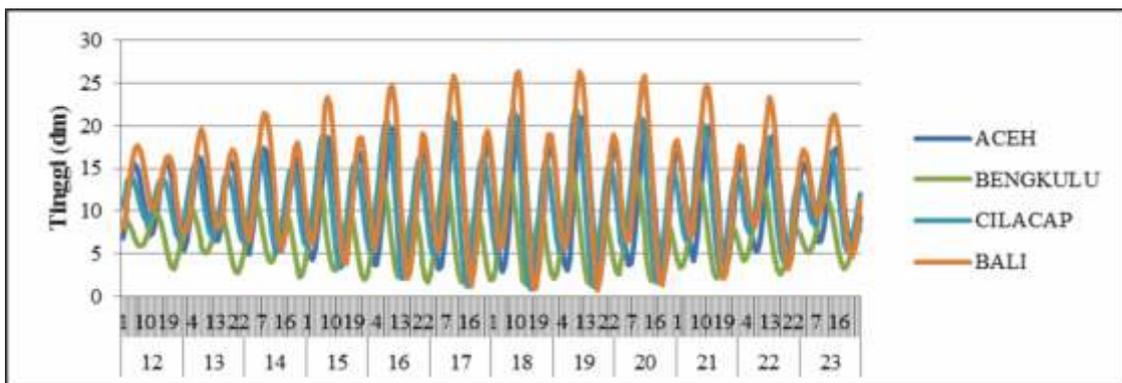
Gambar 7. Grafik fluktuasi gelombang signifikan tanggal 12-23 Mei 2007 simulasi WAVEWATCH-III.



Gambar 8. Grafik perbandingan gelombang signifikan WAVEWATCH-III dan ERA Interim tanggal 12-23 Mei 2007



Gambar 9. Grafik periode gelombang tanggal 12-23 Mei 2007.



Gambar 10. Pasang surut pada tanggal 12-23 Mei 2007

Fluktuasi gelombang pada saat gelombang tinggi menerjang Indonesia terlihat pada Gambar 7. Dan umumnya sesuai dengan yang dilaporkan oleh media massa dan yang terukur oleh satelit observasi pada Gambar 8. Gelombang dengan tinggi sekitar 3 m mulai menerjang pantai barat Sumatera sampai Nusa Tenggara pada tanggal 17 Mei 2007. Dan gelombang tertinggi umumnya terjadi pada tanggal 18 Mei dan meluruh pada tanggal 19 Mei. Masing-masing daerah umumnya mengalami puncak pada waktu yang berbeda, Padang, Bengkulu, Lampung, Pelabuhan Ratu sampai Sukabumi mempunyai puncak tinggi gelombang sekitar jam 6 UTC tanggal 18 Mei, Aceh puncaknya pukul 18 UTC, sedangkan Cilacap dan Jogjakarta sekitar pukul 9 UTC. Wilayah Bali mengalaminya pukul 15 sedangkan di Flores pukul 3 UTC tanggal 19 Mei. Perbedaan puncak gelombang signifikan ini berhubungan dengan penjarangan gelombang dari Samudera Hindia dimana di *swell* yang mengarah ke Indonesia pertama kali sampai ke Bengkulu, Lampung, Sukabumi dan Pelabuhan Ratu dan kemudian menjaral ke utara dan timur. *Swell* menjaral ke utara menyusuri pantai barat Sumatera menuju Aceh dan ke timur menyusuri pantai selatan Jawa menuju Bali dan Nusa Tenggara.

Korelasi antara simulasi WAVEWATCH-III dan ERA-Interim sangat tinggi dengan nilai 0,92 di Padang, 0,97 di Lampung, 0,96 di Jogjakarta dan 0,96 di Bali. Hal ini menunjukkan adanya kesamaan pola antara model dengan observasinya. Nilai *mean absolute error* (MAE) antara model dengan observasi sebesar 0,45 m di Padang, 0,39 m di Lampung, 0,13 m di Jogjakarta dan 0,15 m di Bali. Tinggi gelombang simulasi model menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibanding dengan pembandingnya, hal ini terjadi karena kedua data mempunyai resolusi yang berbeda, dimana resolusi model adalah $0,25^\circ$ sedangkan data ERA adalah $0,75^\circ$. Data gelombang pada resolusi rendah merupakan perata-rataan beberapa data piksel disekitarnya, sehingga ketika pada satu piksel terdapat gelombang yang lebih tinggi akan tereduksi. Tetapi untuk Padang nilai model lebih rendah dibandingkan observasi, karena letaknya yang terhalang oleh pulau sedangkan data observasi ERA-Interim yang resolusinya lebih rendah tidak memperhitungkan adanya pulau tersebut. Hal ini menyebabkan nilai pembanding lebih tinggi dibandingkan model karena reduksi energi yang diakibatkan oleh keberadaan pulau tersebut tidak diperhitungkan pada data ERA-Interim.

Data *peak period* atau periode gelombang tertinggi juga menunjukkan fluktuasi yang hampir sama dengan fluktuasi tinggi gelombangnya ditunjukkan pada Gambar 9. Periode gelombang yang terbentuk sekitar 20 detik dan hal ini sama dengan panjang gelombang sebesar 625 meter. Gelombang ini ketika memasuki perairan dangkal akan terjadi gesekan dengan dasar laut dan menyebabkan kenaikan gelombang (*wavesetup*). *Wave setup* berkontribusi secara signifikan terhadap kenaikan elevasi muka laut. Pada daerah *continental shelves*, *wave setup* dapat menjadi bagian terbesar dari anomali elevasi muka laut pada saat terjadi badai. Ketika gelombang memasuki laut dangkal akan menyebabkan kehilangan energi dan

gaya total pada kolom air yang berlawanan dengan arah propagasi gelombang. Hal ini akan menyebabkan transfer momentum dan berkaitan dengan *wave setup* [22]. Pada saat terjadi gelombang tinggi di beberapa tempat, gelombang dilaporkan sangat tinggi dan dapat merobohkan bangunan, hal ini terjadi akibat interaksi gelombang dengan dasar laut yang menyebabkan *wave setup* tersebut.

Tinggi gelombang yang disimulasikan model WAVEWATCH-III umumnya lebih rendah dibandingkan dengan pengamatan yang dicatat media massa, hal ini diindikasikan karena interaksi gelombang dengan pasang surut dan hal ini tidak diperhitungkan dalam *wave model*. Pasang surut menyebabkan adanya arus dan gelombang pasang surut. Pada gelombang laut dalam arus pasang surut tidak berpengaruh terhadap gelombang, tetapi pada laut dangkal berpengaruh terhadap kenaikan gelombang [23]. Dari data pasang surut di empat lokasi (Aceh, Bengkulu, Cilacap dan Bali) menunjukkan bahwa antara tanggal 17-20 Mei terjadi pasang yang tinggi seperti terlihat pada Gambar 10. Dari lokasi tersebut menunjukkan bahwa pada tanggal 18 Mei merupakan puncak pasang. Rekaman tinggi gelombang menunjukkan bahwa pada tanggal tersebut merupakan puncak gelombangnya khususnya di pantai barat Sumatera dan selatan Jawa. Sedangkan daerah Bali dan Nusa Tenggara puncaknya pada tanggal 19 Mei.

Catatan media massa menunjukkan bahwa pada tanggal tersebut sebagian besar wilayah Indonesia mengalami gelombang yang tinggi dan menyebabkan genangan di berbagai wilayah. Simulasi mengenai genangan yang diakibatkan oleh gelombang badai (*surge*) tertinggi di kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan NTB, masing-masing terjadi di Nusa Kambangan (Jawa; 19,0 cm), Tuban (Bali; 14,7cm), Teluk Gumbang (Lombok; 12,2 cm), dan Tanjung Labulawah (Sumbawa; 12,5 cm). Jarak genangan maksimum (R) gelombang badai pasang serta tinggi *run-up* yang menyertainya (H) terjadi di Teluk Penanjung (Jawa; $R = 835,2$ m, $H = 0,73$ m), Tuban (Bali; $R = 623,5$ m, $H = 1,02$ m), Tanjung Ringgit (Lombok; $R = 1112,3$ m, $H = 1,03$ m), dan Teluk Cempi (Sumbawa; $R = 4136,5$ m, $H = 1,10$ m)[20].

Tingginya gelombang yang menyebabkan genangan di beberapa wilayah ini merupakan akibat dari superposisi *swell* dengan gelombang pasang terutama yang terjadi pada tanggal 18 Mei. Superposisi kedua jenis gelombang ini mengakibatkan lonjakan gelombang secara eksponensial sehingga gelombang yang dihasilkan akan menjadi tinggi. Kenaikan air laut akan melebihi ketinggian normal ketika terjadi bersamaan dengan pasang dan akibatnya memperparah genangan. Choi, et al [24], melaporkan bahwa gelombang laut yang diakibatkan oleh badai akan bertambah tinggi ketika bersamaan dengan adanya pasang surut berkisar antara 0,5 – 1 meter di sekitar Laut Kuning.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa model WAVEWATCH-III secara umum dapat mensimulasikan kejadian gelombang tinggi yang diakibatkan oleh *swell* dengan baik seperti kejadian tanggal 17-19 Mei 2007 dimana terdapat korelasi yang tinggi antara WAVEWATCH-III dengan ERA-Interim baik tinggi gelombang maupun waktu kemunculannya. Perbedaan tinggi gelombang yang dilaporkan media massa dengan simulasi model diakibatkan oleh superposisi antara pasang surut dan gelombang *swell*. Tetapi pada kasus ini faktor dominannya adalah *swell*. Sedangkan perbedaan tinggi gelombang antara model dengan data pembandingan berkaitan dengan resolusi kedua data yang berbeda. Interaksi gelombang dengan dasar laut pada laut dangkal berperan penting terhadap kenaikan tinggi gelombang (*wave setup*) terutama di pantai sehingga mengakibatkan genangan dan kerusakan infrastruktur di berbagai tempat.

Saran. Untuk melihat seberapa jauh pengaruh dari interaksi antara pasang surut dengan gelombang terhadap penambahan tinggi run up, sebaiknya dijalankan *couple model* antara *ocean model* dengan *wave model* sehingga interaksi keduanya dapat diperhitungkan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Gohari, A. A., Bahai, H. & Bazargan, H. (2009). Simulation of significant wave height by neural networks and its application to extreme wave analysis. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 778-792.
- [2] Wang, X. L & Swail V. R. (2001). Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J. of Climate*, 14, 2204-2221
- [3] Jian-Guo Li, J. G. & Holt, M. (2009). Comparison of Envisat ASAR ocean wave spectra with buoy and altimeter data via a wave model. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 593-613.
- [4] Kurniawan, R., Habibie, M. N. & Permana, D. S. (2012). Kajian daerah rawan gelombang tinggi di Perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. 13(3), 201-212.
- [5] Phillips, M. O., Gu, D. & Donelan, M. (1993). Expected structure of extreme waves in a Gaussian Sea. Part 1 : Theory and SWADE buoy measurements. *J. of Physical Oceanography*. 23, 992-1000.
- [6] Garrett, C. & Muller, P. (2008). Extreme events. *Supplement : Bulletin of American Meteorological Society*.
- [7] Gemmrich, J & Garrett, C. (2008). Unexpected waves. *J. of Physical Oceanography*. 38, 2330-2336.
- [8] Hernández, R. P., Perrie, W., Toulany, B. & Smith, P. C. (2007). Modeling of two Northwest Atlantic storms with third-generation wave models. *Weather and Forecasting*. 22, 1229-1242.
- [9] World Meteorological Organization (WMO). (1998). *Guide to Wave Forecasting and Analysis*, WMO-No. 702, Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [10] Komen, G.L., Cavaleri, L., Domelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E., (1994). *Dynamics and Modeling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, Cambridge (p. 532).
- [11] National Center for Environmental Prediction (NCEP) – NOAA. (2012). (<http://www.mmm.ucar.edu/>), diakses Maret 2012.
- [12] Sofian, I & Wijanarto, A. B. (2010). Simulation of significant wave height climatology using WAVEWATCH-III. *International Journal of Geoinformatic*, vol. 6 no. 4, 13-19
- [13] US Geological Survey (USGS). (2012). (<http://www.usgs.gov/>), diakses Maret 2012.
- [14] European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF)-ERA-Interim. (2013). (http://data-portal.ecmwf.int/data/d/license/interim_full/), diakses 9 Oktober 2013.
- [15] Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14. Environmental Modeling Center. Marine Modeling and Analysis Branch. NCEP.
- [16] Cavaleri, L. & Malanotte-Rizzoli, P. (1981). Wind-wave prediction in shallowwater: Theory and applications. *J. Geophys. Res.*, 86, 10.961-10.973.
- [17] Tolman, H. L. & Chalikov, D. (1996). Source term in a third-generation wind wave model. *J. of Physical Oceanography*. 26, 2497-2518.
- [18] Battjes, J. A. & Janssen, J. P. F. M., (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 569-587. ASCE.
- [19] Kompas, 19 Mei 2007. (website: www.kompas.com) diakses tanggal 27 April 2012.
- [20] Ningsih, N. S., Hadi, S., Harto, B. A., Utami, M. D. & Rudiawan, A. P. (2010). Kajian daerah rawan bencana gelombang badai pasang (*storm tide*) di kawasan pesisir selatan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Ilmu Kelautan*. 15(4), 179-193.
- [21] Young, I. R. (1999). Wind generated ocean waves. Elsevier Science Ltd. Kidlington, Oxford. P228.
- [22] Dean, R. G. & Bender, C. J. (2006). Static wave setup with emphasis on damping effects by vegetation and bottom friction. *J of Coastal Engineering*. 53, 149-156.
- [23] Janssen, P. A. E. M., & Onorato, M. (2007). The intermediate water depth limit of the Zakharov equation and consequences for wave prediction. *J. of Physical Oceanography*. 37, 2389-2400.
- [24] Choi, B. H., H. M. Eun & S. B. Woo. (2003). Modeling of coupled tide-wave-surge process in the Yellow Sea. *J of Ocean Engineering*. 30, 739-759.