

VERIFIKASI TINGGI GELOMBANG MODEL WAVEWATCH-III MENGUNAKAN DATA SATELIT ALTIMETRI DAN OBSERVASI

VERIFICATION OF WAVEWATCH-III WITH ALTIMETRY SATELLITE AND OBSERVATION DATA

Muhammad Najib Habibie*, Wido Hanggoro, Donald S. Permana, Roni Kurniawan

Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

*E-mail: najib.habibie@bmk.go.id

Naskah masuk: 21 Juni 2016; Naskah diperbaiki: 17 Nopember 2016; Naskah diterima: 22 Desember 2016

ABSTRAK

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. Model prakiraan gelombang yang mulai diaplikasikan adalah WAVEWATCH-III yaitu sebuah model spektral lengkap dengan representasi eksplisit pada proses fisik yang relevan terhadap evolusi gelombang dan yang memberikan gambaran dua dimensi dari laut secara lengkap. Penerapan di Indonesia model ini masih terbilang baru, untuk itu perlu diadakan verifikasi hasil model dengan observasi di lapangan. Pada penelitian ini dilakukan evaluasi model WAVEWATCH-III di Manokwari, Saumlaki, Selat Bangka dan Surabaya untuk mengetahui performanya. Model diseting pada dua domain, domain global dan wilayah Indonesia dengan resolusi $0,5^\circ$ dan $0,125^\circ$ dan dirunning selama setahun (2012). Luaran model kemudian dibandingkan dengan data AVISO serta data observasi insitu. Hasil penelitian menunjukkan korelasi antara luaran model dengan data AVISO di 4 titik yang dianalisa umumnya nilainya dibawah 0,5. Hanya di beberapa tempat yang menunjukkan korelasi yang besar diantaranya adalah Saumlaki dan Manokwari. Kedua lokasi ini terletak pada laut yang relatif terbuka, hal ini menunjukkan bahwa pada lokasi yang relatif terbuka AVISO dapat digunakan untuk verifikasi model, akan tetapi pada perairan yang sempit (Surabaya dan Bangka) AVISO kurang baik untuk verifikasi model. Terdapat bias antara luaran model dengan observasi insitu yang berada di pantai yang dangkal sehingga model tidak dapat merepresentasikan kondisi faktual dengan sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa dengan resolusi $0,5^\circ$ dan $0,125^\circ$ model belum dapat digunakan untuk verifikasi tinggi gelombang di daerah pantai. Dari perbandingan antara observasi insitu dengan luaran model pada dua resolusi yang berbeda menunjukkan bahwa pada resolusi yang lebih tinggi, luaran model menunjukkan hasil yang lebih mendekati observasinya.

Kata kunci: WAVEWATCH-III, AVISO, tinggi gelombang

ABSTRACT

Wave forecasting model becomes a major component in the wave prediction information today. This happens due to lack of in-situ observations. WAVEWATCH-III is the third generation model which is a refinement of the previous wave model, a complete spectral models with an explicit representation of the physical processes that are relevant to the evolution of the wave and gives full of two-dimensional description of the ocean. It was beginning applicated in Indonesia and need to verify with in situ observation. In this research, WAVEWATCH-III performance has been evaluated in Manokwari, Saumlaki, Bangka Strait and Surabaya. Model setup on two domains, global domains and Indonesia regions with 0.5° and 0.125° resolution and running for a year (2012). The model were compared with the AVISO and in-situ observation data. The results showed a correlation between the model and AVISO generally below 0.5. Only in Saumlaki and Manokwari showed correlation more than 0,5. Both locations lies in the open sea, this suggests that the AVISO can be used to verify the model in open sea, but the close sea (Surabaya and Bangka) AVISO unfavorable for verification of the model. There is a bias between the model with in situ observations that are in shallow coastal so the model can not represent the conditions perfectly factual. This suggests that with a resolution of 0.5° and 0.125° models can not be used to verify the wave in coastal areas. From the comparison between in situ observations with the model outputs at two different resolutions shows that the higher the resolution resulted better performance.

Keywords: WAVEWATCH-III, AVISO, waveheight

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan 70% wilayah teritorialnya berupa lautan. Posisinya berada diantara benua Asia dan Australia serta diapit oleh Samudera Hindia dan Pasifik, hal ini merupakan posisi yang sangat strategis dalam rute pelayaran internasional [1]. Informasi mengenai dinamika perubahan cuaca dan keadaan permukaan laut menjadi sangat penting untuk menunjang kegiatan-kegiatan kelautan seperti penelitian, operasi pelayaran untuk transportasi laut, penangkapan ikan, eksplorasi sumber daya laut serta pembangunan di sektor kelautan lainnya.

Gelombang merupakan salah satu dinamika permukaan laut yang dapat mempengaruhi kegiatan kelautan, oleh sebab itu dalam pelayanan informasi meteorologi kelautan (*marine meteorological services*) informasi ini merupakan bagian terpenting yang harus ada di dalamnya (WMO-No. 4, 2001) [2]. Angin juga merupakan bagian yang penting untuk ditampilkan pada informasi meteorologi maritim. Observasi *in situ* gelombang sangatlah terbatas jumlahnya dibandingkan dengan luasan laut yang ada. Tingkat kerapatannya juga lebih rendah dibandingkan dengan stasiun pengamatan cuaca. Pemodelan menjadi solusi dari permasalahan ini [2]. Dewasa ini sebagian besar pelayanan informasi meteorologi maritim dipenuhi menggunakan data model.

Model prakiraan gelombang telah mengalami evolusi dan penyempurnaan dari waktu ke waktu. Model generasi pertama dikembangkan berdasarkan perhitungan input linear dan peluruannya sebagai komponen utama pembentukan gelombang. Model generasi ke dua berkembang lebih jauh dengan memperhitungkan gelombang non linear, akan tetapi masih terbatas pada parameterisasi secara sederhana. Peluruhan gelombang pada model ini telah dikembangkan lebih lanjut yaitu dengan diperhitungkannya *white capping* dan interaksi dengan dasar laut[3]. Model generasi ke tiga 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 yang memberikan gambaran dua dimensi dari laut secara lengkap. Model generasi ini merupakan pembaruan dari model sebelumnya yaitu dengan adanya kalkulasi gelombang nonlinear secara langsung tidak hanya sebatas parameterisasi. 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>[4].

Penerapan model WAVEWATCH-III di wilayah lain menunjukkan hasil yang bagus dibandingkan dengan model generasi ke tiga yang lain. Penelitian yang dilakukan oleh Hanson, *et al.* (2008) dalam Ramdhani (2015) [5], menunjukkan performa WAVEWATCH-III di S. Pasifik ketika dibandingkan dengan model WAM dan WAVAD memiliki korelasi tertinggi. Komponen yang dibandingkan adalah *wind sea*, *young swell* dan *mature swell*.

Model generasi ke tiga merupakan model gelombang yang relatif baru bagi Indonesia. Selama ini informasi meteorologi maritim dipenuhi oleh penerapan model generasi ke dua. Upaya penyempurnaan sistem prakiraan gelombang perlu dilakukan, salah satunya dengan penerapan model gelombang generasi ke tiga. Sebelum dioperasikan menjadi sistem prakiraan perlu dilakukan evaluasi dan monitoring kualitas hasil luaran model[6]. Kajian ini merupakan salah satu tahapan evaluasi untuk mengetahui karakteristik model ketika diaplikasikan di wilayah Indonesia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performa model dalam mensimulasikan tinggi gelombang dibandingkan dengan data lapangan yang berupa data satelit altimeter dan pengukuran langsung.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian dan pengembangan model WAVEWATCH-III ini digunakan beberapa data yaitu data input model dan data observasi untuk pembandingan. Data input model yang digunakan adalah *Final reanalysis* per 6 jam (00, 06, 12, 18 UTC) dan prediksi angin pada ketinggian 10 meter, per 6 jam dengan jangka prakiraan hingga 192 jam dari GFS (*Global Forecasting System*), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) – NOAA. Resolusi spasial kedua jenis data adalah 0.5° ($\approx 55,5$ km). Data di *download* melalui Website: <http://www.mmm.ucar.edu/>. [7] Bathymetri etopo resolusi $2'$ ($\approx 3 \times 3$ km) dari *US Geological Survey* (USGS), website: <http://www.usgs.gov/>. [8]

Data obeservasi yang digunakan adalah data tinggi gelombang signifikan (SWH) oleh pengukuran satelit altimeter Archiving, Validating and Interpretation of Satellite Oceanographic (AVISO) dengan resolusi 1° yang dapat di *download* di <ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/pub/oceano/AVISO/wind-wave/nrt/mswh/merged/>[9] dan data pengukuran gelombang menggunakan wave recorder dari Dinas Hidro Oseanografi TNI AL (DISHIDROS).

Model gelombang yang diadopsi adalah WAVEWATCH-III, Versi 3.14 yang dikembangkan oleh EMC-NOAA-NCEP, USA. *Software* model gelombang ini merupakan *open sources software* yang dapat diperoleh dari website dengan mendaftar ke NOAA. Model dijalankan pada dua domain yaitu global (180° BB – 180° BT; 70° LS – 70° LU) dengan resolusi spasial 0.5° (~55 km) dan regional Indonesia (90° BT – 150° BT; 15° LS – 15° LU) dengan resolusi spasial 0.125° (~14 km). Model dijalankan dengan metode *two way nesting* dimana pada daerah *boundary* kedua domain baik global maupun regional dapat saling mempengaruhi. *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. [10]

Perhitungan linear input menggunakan perhitungan berdasarkan penelitian Cavaleri dan Malanotte-Rizzoli 1981 [11] input angin berdasar Tolman dan Chalikov 1996[12], interaksi gelombang nonlinear dihitung dengan *Discrete Interaction Approximation* (DIA), sedangkan untuk memperhitungkan peluruhan energi (*dissipation*) berdasarkan ketentuan Tolman dan Chalikov, (1996). Perhitungan gesekan dasar laut

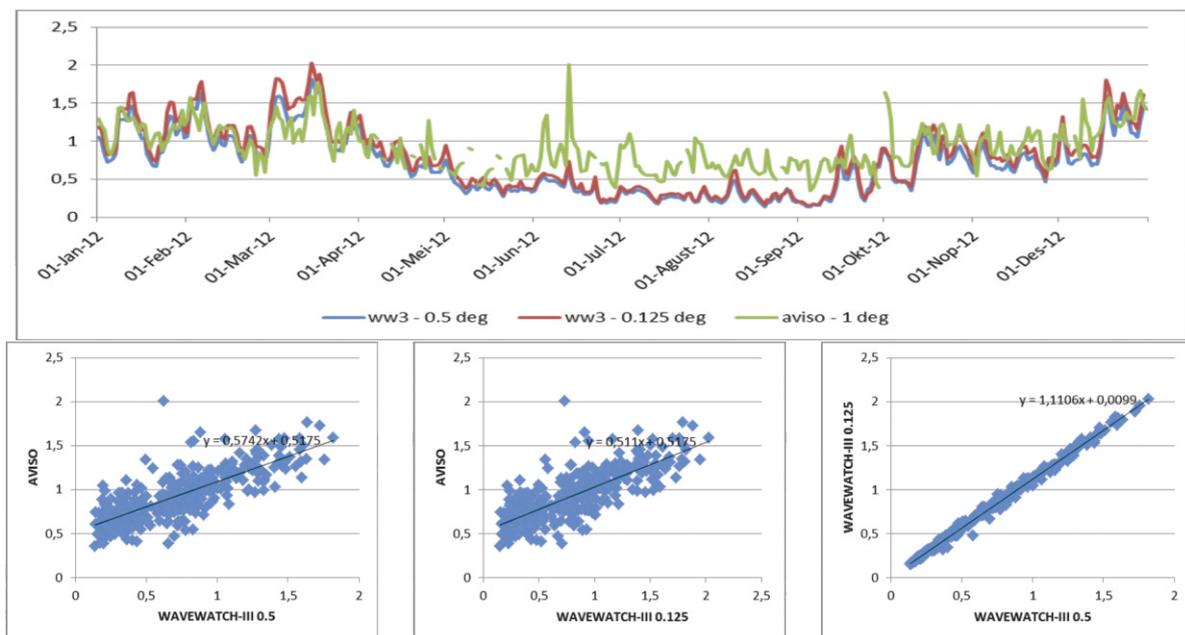
(*bottom friction*) berdasarkan *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP), 1973, sedangkan untuk gelombang pecah (*surf breaking*) diperhitungkan berdasar penelitian Betjess dan Jennessen, (1978)[13].

3.Hasil Dan Pembahasan

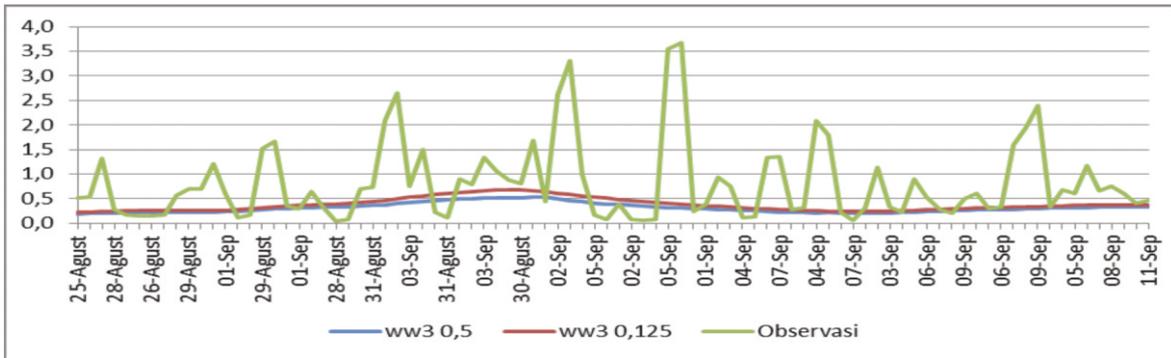
Hasil simulasi model gelombang WAVEWATCH-III dengan resolusi 1° dan 0,125° pada empat lokasi yaitu Manokwari, Saumlaki, Bangka dan Surabaya diverifikasi menggunakan data satelit AVISO dan observasi insitu yang diukur oleh *wave recorder* (gambar 1 – 8).

Perairan Manokwari. Terdapat kesamaan nilai dan pola antara AVISO dan model perairan Manokwari. Korelasi antara AVISO dan model sebesar 0,78, hal ini menunjukkan adanya kemiripan pola diantara keduanya. Dari *scatter plot* dapat dilihat bahwa kedua data menyebar dengan merata. Hanya terdapat sedikit sekali data pencilan dimana AVISO memiliki nilai yang lebih tinggi dari pada model. Bias yang relatif besar terdapat pada bulan Juni-Agustus yaitu 0,2-1,3 meter (gambar 1).

Posisi Manokwari yang berbatasan dengan laut terbuka Pasifik sebelah barat dimungkinkan menyebabkan hasil kedua data tersebut memiliki kesamaan nilai dan polanya. Berbeda dengan daerah *inner sea* yang cenderung *under estimate* dan kebanyakan memiliki ketidaksamaan pola dengan AVISO karena adanya pengaruh daratan yang tidak terhitung pada AVISO, di Manokwari faktor ini tereduksi.



Gambar 1. Perbandingan tinggi gelombang signifikan antara model dengan AVISO di Manokwari

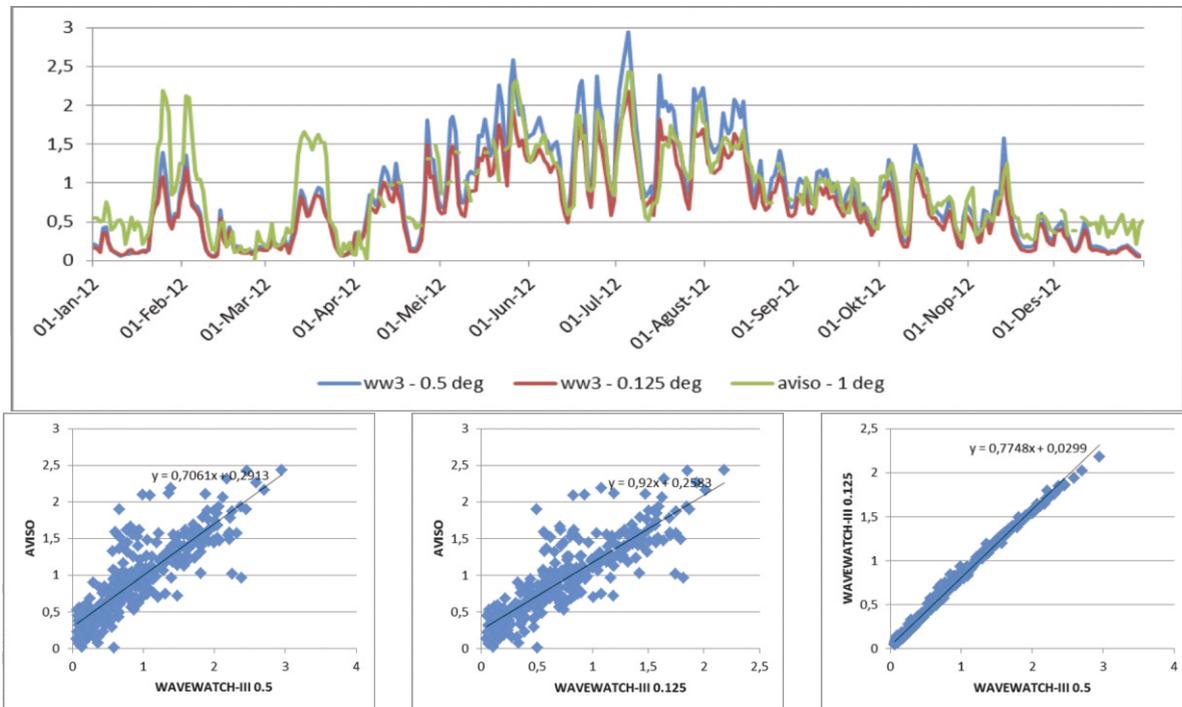


Gambar 2. Perbandingan data model WAVEWATCH-III dengan data observasi di Manokwari tanggal 15 Agustus – 11 September 2012.

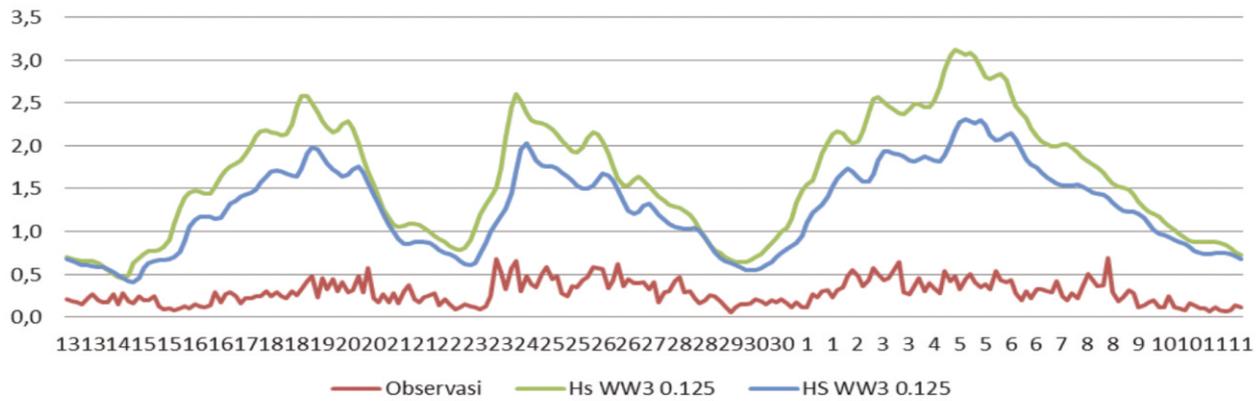
Perbandingan antara tinggi gelombang observasi insitu di Monokwari dengan hasil simulasi model menunjukkan bias yang besar berkisar antara 0,5-3 m. Kondisi gelombang yang fluktuatif dilapangan seperti yang terukur pada observasi insitu tidak diikuti dengan baik polanya oleh model. Hal ini berbeda ketika dibandingkan dengan data AVISO yang mempunyai tinggi gelombang hampir sama dengan luaran modelnya. Tetapi pada resolusi yang tinggi (0,125°), luaran model menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan resolusi 0,5° dan lebih mendekati nilai observasi insitunya (gambar 2).

Perairan Saumlaki. Korelasi antara data AVISO dengan model di perairan Saumlaki sebesar 0,86

untuk resolusi 0,5° sedangkan pada resolusi 0,125° korelasinya 0,87. Pola data AVISO dan model sangat mirip hanya ada sedikit perbedaan nilainya saja. Pada bulan Desember-Januari dan Maret model mengalami *under estimate* walaupun polanya sama dengan AVISO. Dari diagram *scatter plot* menunjukkan adanya sebaran data yang merata antara hasil model dan AVISO (gambar 3). Hanya sedikit data yang memiliki perbedaan nilai, dan biasanya pun termasuk kecil yaitu kurang dari 0,5 meter. Bias model seperti ini masih dapat ditoleransi untuk memberikan informasi prakiraan karena perbedaannya tidak signifikan. Hal ini menunjukkan performa model yang baik untuk mensimulasikan kondisi harian perairan di Saumlaki.



Gambar 3. Perbandingan tinggi gelombang signifikan antara model dengan AVISO di Saumlaki



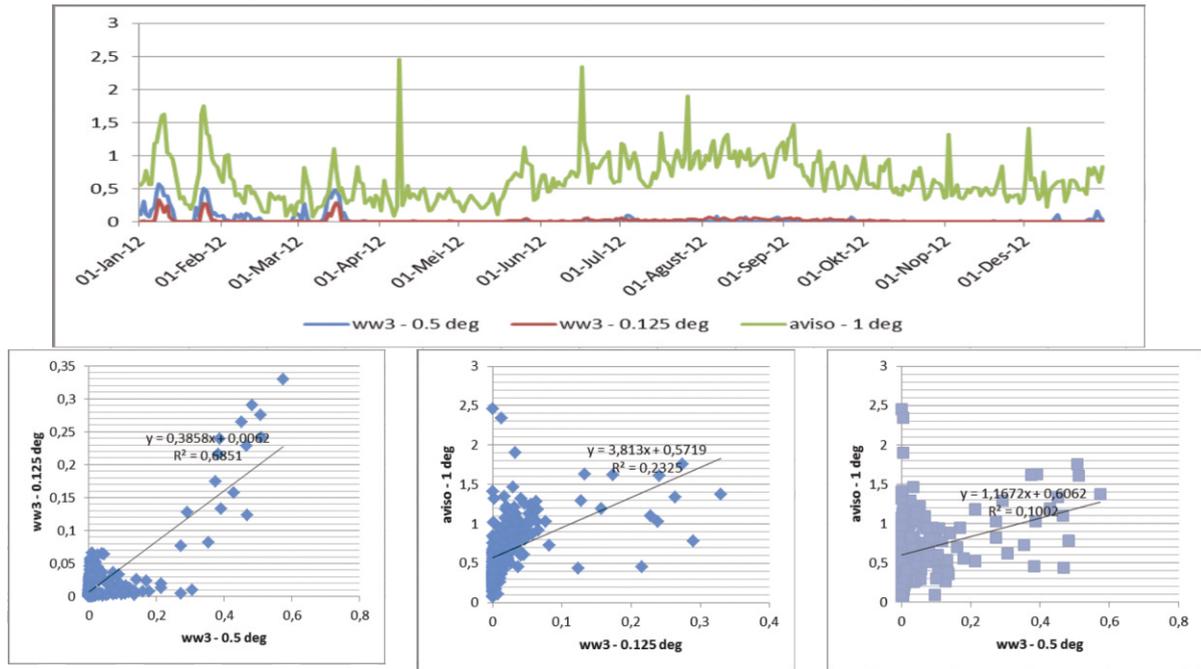
Gambar 4. Perbandingan data model WAVEWATCH-III dengan data observasi di Saumlaki tanggal 13 Juni - 12 Juli 2012

Data model ketika dibandingkan dengan data observasi lapangan (13 Juni - 12 Juli 2012) terlihat selisih yang sangat besar mencapai 2,5 meter, seperti pada Gambar 4. Hasil pengukuran observasi sangat bergantung kepada penempatan alatnya. Jika penempatan alatnya terlalu ke tepi atau terhalang oleh pulau, maka tinggi gelombangnya akan kecil. Data seperti ini tentunya tidak akan bisa mewakili data simulasi yang mempunyai resolusi lebih rendah. Korelasi antara data model dan observasi pada periode ini mencapai 0,65. Hal ini menunjukkan pola kedua data mempunyai kemiripan, hanya saja nilainya yang berbeda sangat jauh.

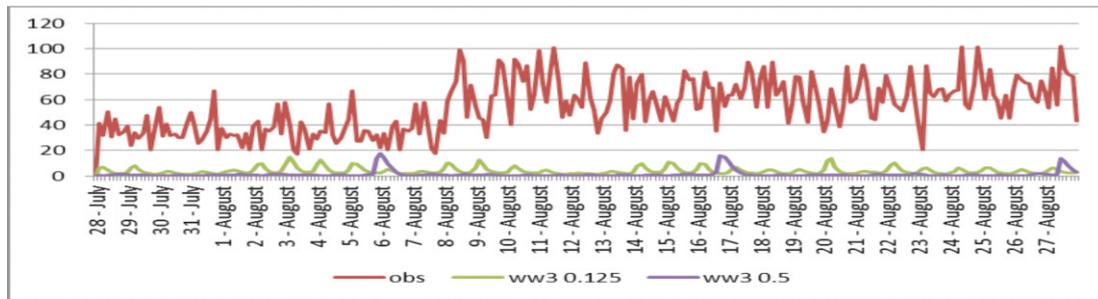
Perairan Selat Bangka. Perbandingan antara AVISO dan simulasi model di Selat Bangka menunjukkan adanya bias yang besar yaitu sampai 2,5 meter dimana model mempunyai nilai yang lebih rendah seperti terlihat pada Gambar 5. Pada bulan Januari-Maret model masih mempunyai pola yang hampir sama dengan AVISO, tetapi pada bulan yang lain pola keduanya tidak sama. Tidak terdapat perbedaan yang nyata antara hasil model dengan resolusi 0,5° dan 0,125° ketika dibandingkan dengan AVISO, karena

hasil model memiliki pola dan nilai yang hampir sama. Begitu juga ketika model dibandingkan dengan data observasi insitu dari dua periode pengamatan bulan Agustus dan Desember, model menunjukkan hasil *under estimate* dan polanya tidak mengikuti observasinya.

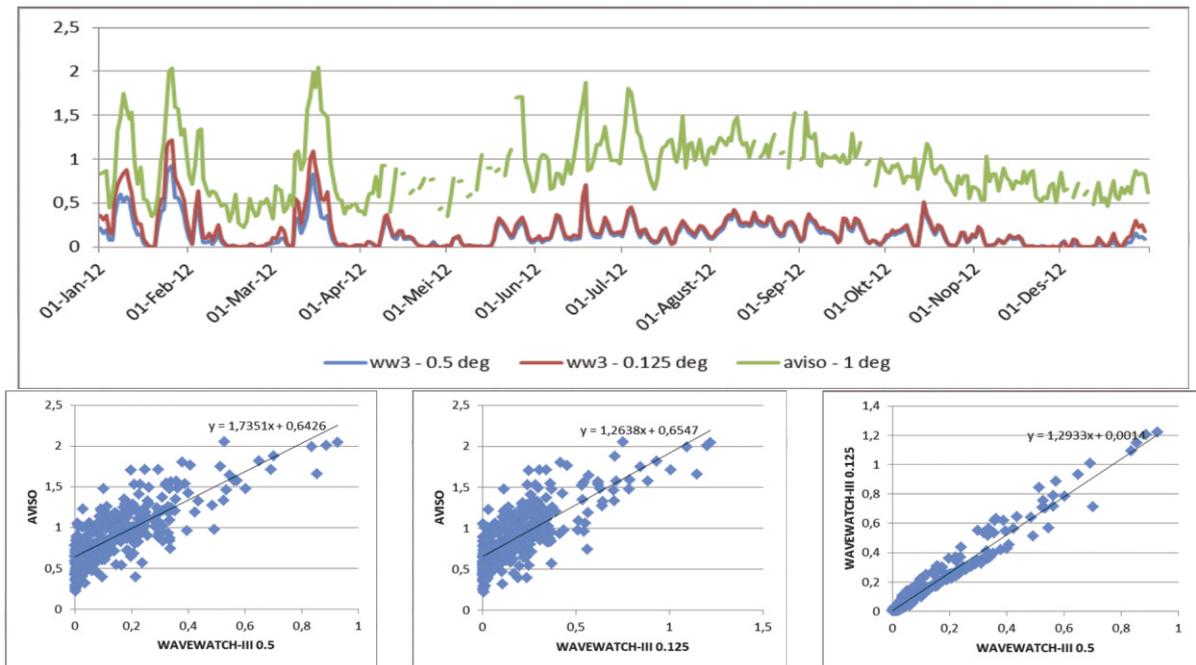
Perbandingan antara observasi insitu dan luaran model WAVEWATCH-III di perairan Bangka menunjukkan hasil yang sangat berbeda. Luaran model umumnya menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan observasinya. Lokasi pengambilan data gelombang terletak di teluk menyebabkan adanya perbedaan antara model dengan observasi insitu. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang di Teluk Inggris (Bangka) belum disimulasikan oleh model dengan baik pada resolusi 0,5° dan 0,125° sehingga nilainya berbeda jauh dengan kondisi lapangan. Perbedaan antara simulasi model dengan observasi insitu antara 0,2-0,8 m pada bulan Agustus sedangkan pada bulan Desember biasanya lebih besar mencapai lebih dari 2 meter (gambar 6).



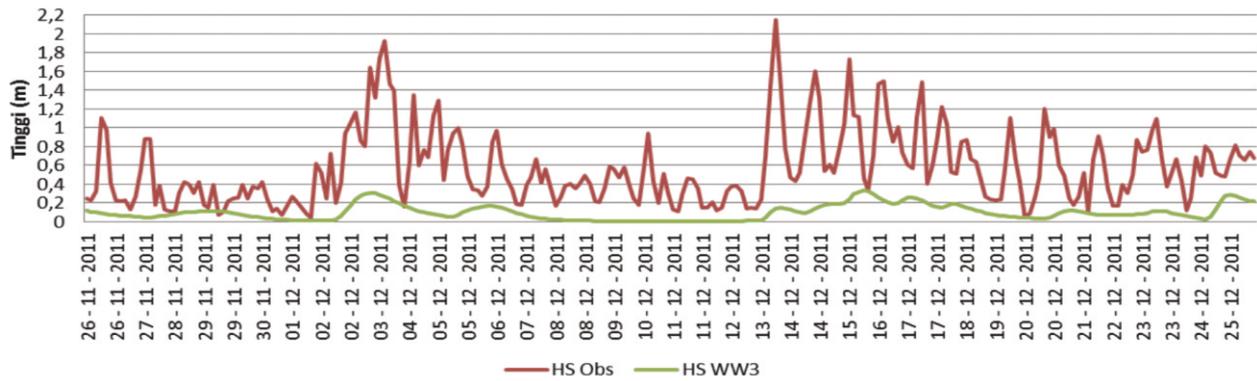
Gambar 5. Perbandingan tinggi gelombang signifikan antara model dengan AVISO di Bangka



Gambar 6. Perbandingan data model WAVEWATCH-III dengan data observasi di Bangka tanggal 28 Juli – 27 Agustus 2012.



Gambar 7. Perbandingan tinggi gelombang signifikan antara model dengan AVISO di Surabaya



Gambar 8. Perbandingan tinggi gelombang signifikan antara model dengan obserasi di Surabaya

Perairan Surabaya. Data rata-rata harian AVISO di sekitar Surabaya menunjukkan adanya variasi yang tinggi. Pada bulan Januari dan Maret terjadi fluktuasi tinggi signifikan yang sangat tinggi dibandingkan bulan-bulan lainnya. Perbandingan antara AVISO dan simulasi model di Surabaya menunjukkan adanya bias yang besar yaitu berkisar 1 meter dimana model mempunyai nilai yang lebih rendah. Tidak terdapat perbedaan yang nyata antara hasil model dengan resolusi $0,5^\circ$ dan $0,125^\circ$ ketika dibandingkan dengan AVISO, karena hasil model memiliki pola dan nilai yang hampir sama (gambar 7). Begitu juga ketika model dibandingkan dengan data observasi, model menunjukkan hasil *under estimate* dan polanya tidak mengikuti observasinya seperti pada gambar 8.

Korelasi antara model dan observasinya mencapai 0,6, tetapi keduanya memiliki bias yang besar mencapai 2 meter. Dari data tersebut model juga tidak bisa mengikuti fluktuasi yang terjadi pada observasi. Hal ini menunjukkan bahwa resolusi model tidak bisa mewakili kondisi titik oservasi yang sangat spesifik. Banyak kondisi-kondisi di lapangan yang berpengaruh terhadap gelombang di suatu tempat, disederhanakan sehingga model menghasilkan simulasi yang berbeda dibandingkan observasinya.

Korelasi antara luaran model dengan data AVISO di 10 titik yang dianalisa menunjukkan bahwa pada umumnya nilainya rendah dibawah 0,5. Hanya di beberapa tempat yang menunjukkan korelasi yang besar diantaranya adalah Simeule, Saumlaki, Manokwari dan Pulau Komodo. Dilihat dari lokasinya keempat titik pengamatan ini terletak pada laut yang relatif terbuka, hal ini menunjukkan bahwa pada lokasi yang relatif terbuka AVISO dapat digunakan untuk verifikasi model, akan tetapi pada perairan yang sempit AVISO kurang baik untuk verifikasi model yang ditunjukkan dengan korelasi yang rendah antara luaran model dengan AVISO.

Dari perbandingan data observasi insitu dengan luaran model menunjukkan bahwa umumnya luaran

model cenderung *under estimate*. Dari empat titik observasi insitu hanya dua titik yang menunjukkan nilai observasi lebih tinggi dibandingkan dengan luaran model yaitu di Surabaya dan Bangka. Adanya perbedaan nilai antara luaran model dengan observasi insitu ini dimungkinkan karena penentuan lokasi observasi yang berada di pantai dangkal sehingga model tidak dapat merepresentasikan kondisi faktual dengan sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa dengan resolusi $0,5^\circ$ dan $0,125^\circ$ model belum dapat digunakan untuk verifikasi gelombang di daerah pantai. Dari perbandingan antara observasi insitu dengan luaran model pada dua resolusi yang berbeda menunjukkan bahwa pada resolusi yang lebih tinggi luaran model menunjukkan hasil yang mendekati observasinya. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi resolusi model yang dijalankan akan lebih dapat menggambarkan kondisi faktual di lapangan. Korelasi antara laut terbuka seperti Manokwari dan Saumlaki menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan perairan tertutup, hal ini sejalan dengan penelitian Ardhuin, et al. 2007 yang menyebutkan di Mediterania hasil model menunjukkan hasil yang tidak akurat dan cenderung lebih rendah.

Disamping itu keterlambatan pengukuran oleh satelit pada saat gelombang sedang tinggi juga menyebabkan perbedaan antara model dengan pengukurannya. Perbedaan bisa berkisar $0,5\text{ m}$ [14]. Perbandingan data model dengan satelit altimeter juga menunjukkan hasil yang kurang baik terutama gelombang yang rendah, karena data satelit tidak bisa mengukur gelombang dengan ketinggian $0,5\text{ m}$ sedangkan gelombang dengan tinggi sampai 1 m secara sistematis akan lebih tinggi dibanding model. Hal ini sejalan dengan penelitian ini yang menunjukkan bahwa pada perairan tertutup yang tinggi gelombangnya kurang dari $0,5\text{ m}$, satelit altimetri menunjukkan hasil yang kurang bagus dibandingkan dengan perairan terbuka yang tinggi gelombangnya lebih dari $1,5\text{ meter}$. Dalam penelitiannya Ardhuin et al. (2007) hanya

menggunakan data satelit dengan tinggi gelombang minimal 1,5 meter untuk verifikasi model.

Model gelombang akan menunjukkan akurasi yang menurun ketika mendekati pantai untuk mengatasinya diperlukan model dengan resolusi tinggi[14]. Dalam penelitian ini data observasi diperoleh dari lokasi perairan yang dekat dengan pantai, oleh sebab itu hasil model juga tidak begitu bagus dibandingkan dengan observasinya. Performa model juga akan lebih menurun ketika arah gelombang tidak mengarah ke pantai[14].

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa model gelombang WAVEWATCH-III memiliki kesamaan pola dengan data satelit altimetri AVISO pada daerah laut terbuka yang tinggi gelombangnya relatif tinggi dibanding di sekitar pantai, sedangkan di laut sempit, korelasinya lebih rendah karena satelit altimeter mempunyai keterbatasan ketika mengukur tinggi gelombang yang rendah. Model umumnya mengalami under estimate terhadap data observasi in situ dan tidak mengikuti fluktuasi faktualnya akibat penempatan alat yang terlalu dangkal. Resolusi model berpengaruh terhadap kualitas data yang dihasilkan dimana pada resolusi yang lebih tinggi model mempunyai nilai yang lebih mendekati observasinya.

Daftar Pustaka

- [1] 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.
- [2] World Meteorological Organization (WMO). (1998). Guide to Wave Forecasting and Analysis, WMO-No. 702, Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [3] Komen, G.L., Cavaleri, L., Domelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E. 1994. *Dynamic and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, Cambridge (p.532).
- [4] <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> diakses Maret 2011
- [5] Ramdhani, A. (2015). Pengaruh Siklon Tropis dan Madden-Julian Oscillation (MJO) Terhadap Kejadian Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia bagain Dalam. Program Studi Sains Kebumian Institut Teknik Bandung. *Disertasi*.
- [6] Bidlot, J-R., Holmes, J. D., Wittmann, P. A, Lalbeharry, R., Chen, H. S. (2002). Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting System with Buoy Data. *J. Weather and Forecasting*. 17, 287-310
- [7] National Center for Environmental Prediction (NCEP)–NOAA. <http://www.mmm.ucar.edu/>, diakses Maret 2012.
- [8] U S Geological Survey (USGS). (<http://www.usgs.gov/>), diakses Maret 2012.
- [9] AVISO (Archiving, Validating and Interpretation of Satellite Oceanographic data) <ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/pub/oceano/AVISO/wind-wave/nrt/mswh/merged/> diakses Maret 2013
- [10] Tolman, H. L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14*. Environmental Modeling Center. Marine Modeling and Analysis Branch. NCEP.
- [11] Cavaleri, L. & Malanotte-Rizzoli, P. (1981). Wind-wave prediction in shallow water: Theory and applications. *J. Geophys. Res.*, 86, 10.961-10.973.
- [12] Tolman, H. L. & Chalikov, D. (1996). Source term in a third-generation wind wave model. *J. of Physical Oceanography*. 26, 2497-2518.
- [13] 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.
- [14] Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J-R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Levefre, J-M., & Wittmann, P. A. (2007). Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *J. Ocean Engineering*. 34, 526–541