

VERIFIKASI LUARAN MODEL GELOMBANG WINDWAVES-05 DENGAN SATELIT ALTIMETER

VERIFICATION OF WINDWAVES-05 OUTPUT WITH SATELLITE ALTIMETRY

Roni Kurniawan*, Donald S. Permana, Suratno, M. Najib Habibie

Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta 10720 – Indonesia

**e-mail : ronie_354@yahoo.co.id*

Naskah masuk: 23 Mei 2013; Naskah diperbaiki: 17 Desember 2013; Naskah diterima: 24 Desember 2013

ABSTRAK

Di negara kepulauan seperti Indonesia, informasi tentang tinggi gelombang sangat penting untuk menunjang aktivitas di laut. Mengingat hal tersebut, akurasi prakiraan tinggi gelombang perlu mendapat perhatian. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa model prediksi gelombang laut Windwaves-05 yang digunakan BMKG sejak tahun 2004 terhadap data observasi satelit altimeter AVISO dengan menghitung nilai korelasi, kesalahan absolut, dan kesalahan relatif model selama periode tahun 2010. Dari hasil verifikasi, diperoleh nilai korelasi antara luaran model Windwaves-05 dengan AVISO bervariasi di atas 0,7, dengan nilai korelasi terendah (0,77) diperoleh pada bulan Februari dan yang tertinggi pada bulan Mei (0,94), dan nilai bias absolut tinggi gelombang yang diperoleh umumnya bervariasi kurang dari 0,8 meter, serta kesalahan relatif rata-rata model sebesar 24%. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa model gelombang laut Windwaves-05 mempunyai performa yang cukup baik dan dapat digunakan untuk prakiraan tinggi gelombang di perairan Indonesia.

Kata kunci: Verifikasi, Windwaves-05, Satelit Altimeter, Gelombang laut.

ABSTRACT

In a maritime continent Indonesia, information about sea wave height is highly important for supporting human activities in the ocean. Therefore, the accuracy of wave height prediction must require an intensive attention. This study investigated the spatial performance and accuracy of Windwaves-05 ocean model prediction that have been used by BMKG since 2004 against the altimetry satellite observation data from AVISO for period of 2010 by computing the linear regression correlation, absolute error and its relative error. The verification's results show that the correlation is greater than 0.75 for all months of 2010, with minimum in February (0.77) and maximum in May (0.94). The absolute error varies between 0.2 - 0.8 meter with average relative error of 24%. These results exhibit a relatively good performance of Windwaves-05 and support its application in wave height prediction in Indonesian waters.

Keywords: Verification, Windwaves-05, Altimetry Satellite, Ocean waves.

1. Pendahuluan

Gelombang sangat berpengaruh terhadap berbagai kegiatan di laut, diantaranya transportasi laut, aktivitas penangkapan ikan oleh nelayan dan lain sebagainya. Berbagai dampak akibat adanya gelombang tinggi di perairan Indonesia sudah banyak terjadi, diantaranya selama kurun waktu 2003-2008 terdapat berbagai kecelakaan kapal dengan berbagai ragam faktor penyebab. Dalam kurun waktu tersebut, terdapat 260 kasus kecelakaan kapal akibat faktor alam dan terjadi peningkatan setiap tahunnya [1], sehingga didalam pelayanan informasi meteorologi kelautan (*marine meteorological services*), selain informasi tentang angin, informasi tinggi gelombang

merupakan bagian terpenting yang harus ada dalam setiap jenis informasi kelautan. Informasi ini berguna untuk mendukung berbagai kegiatan kelautan seperti perencanaan dalam upaya mengurangi resiko yang terjadi [2].

Data hasil pengukuran dan observasi di lautan umumnya sangat terbatas dan tidak kontinyu, sehingga banyak institusi di berbagai negara menggunakan *wave hindcast* untuk memperoleh informasi gelombang laut baik untuk kepentingan operasional maupun penelitian. WMO-No.702 [3] melaporkan bahwa data untuk keperluan analisa gelombang laut dapat diperoleh dari dua sumber utama, yaitu: (1) hasil pengukuran dan observasi, dan

(2) hasil estimasi berdasarkan data angin (*wave hindcast*).

Model Windwaves-05 digunakan oleh BMKG sejak tahun 2004 untuk keperluan operasional pelayanan informasi meteorologi maritim di Indonesia secara rutin termasuk juga untuk peringatan dini gelombang tinggi di wilayah perairan Indonesia hingga sekarang. Elemen penting dari setiap sistem operasional prakiraan adalah verifikasi terhadap data observasi, kegiatan verifikasi ini dilakukan terutama untuk perkiraan jangka pendek [4]. Model Windwaves-05 pernah diverifikasi dengan data observasi kapal pada tahun 1997 oleh Suratno [5], dengan nilai korelasi diatas 0,6.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa model gelombang Windwaves-05 dengan membandingkan data luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter gabungan (*merged*) AVISO [6].

Model Windwaves-05 merupakan model gelombang hasil pengembangan berdasarkan model MRI-II (*Marine Research Institute*) dari Jepang yang dilakukan oleh Suratno [5,7] yang digunakan untuk keperluan operasional *Japan Meteorological Agency* (JMA) [8]. Harga batas (*boundary limit*) dalam model ini ditentukan berdasarkan anggapan bahwa transfer energi terjadi di lautan terbuka dan energi gelombang dapat diserap secara sempurna pada batas daratan [5]. Model Windwaves-05 merupakan model ‘laut dalam’, dimana dalam perhitungannya diasumsikan tidak mengalami interaksi dengan dasar laut, sehingga unsur gesekan dengan dasar laut diabaikan [9]. Oleh sebab itu, pada model Windwaves-05 tidak digunakan data batimetri, dan untuk penentuan batas darat dan laut digunakan peta dasar Rupa Bumi Indonesia.

Secara rutin, model Windwaves-05 ini dioperasikan oleh BMKG dengan input data angin permukaan pada level ketinggian 10 meter pada jam 00 UTC dan jam 12 UTC dari Global forecasting Sistem (GFS) National Center for Environmental Prediction (NCEP)-NOAA.

Model gelombang Windwaves-05 merupakan model gelombang generasi II dimana transfer energi non-linier antar gelombang tidak diperhitungkan secara eksplisit tetapi di parameterisasi berdasarkan hasil observasi [5], sedangkan pada model gelombang generasi III, transfer energi non linier antar gelombang dihitung secara eksplisit [10,11,12]. Namun demikian Model gelombang generasi kedua ini telah berhasil diterapkan selama bertahun-tahun dan digunakan sebagai alat operasional di beberapa instansi sampai dengan saat ini, seperti di BMKG.

Persamaan yang digunakan dalam model gelombang Windwaves-05 ini berdasarkan persamaan transfer energi gelombang sebagai berikut [5]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot (C_g S) + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

dengan $S = S(f, \theta)$ adalah spektrum energi sebagai fungsi frekuensi dan arah rambat, t menyatakan waktu, C_g adalah vector kecepatan kelompok gelombang (*group velocity*). Suku $-\nabla \cdot (C_g S)$ menyatakan perubahan energi karena perambatan gelombang (adveksi), S_{in} menyatakan perubahan energi karena masukan dari angin, S_{nl} menyatakan perubahan energi karena tranfer energi non linier antar gelombang, dan S_{ds} menyatakan energi yang hilang (disipasi).

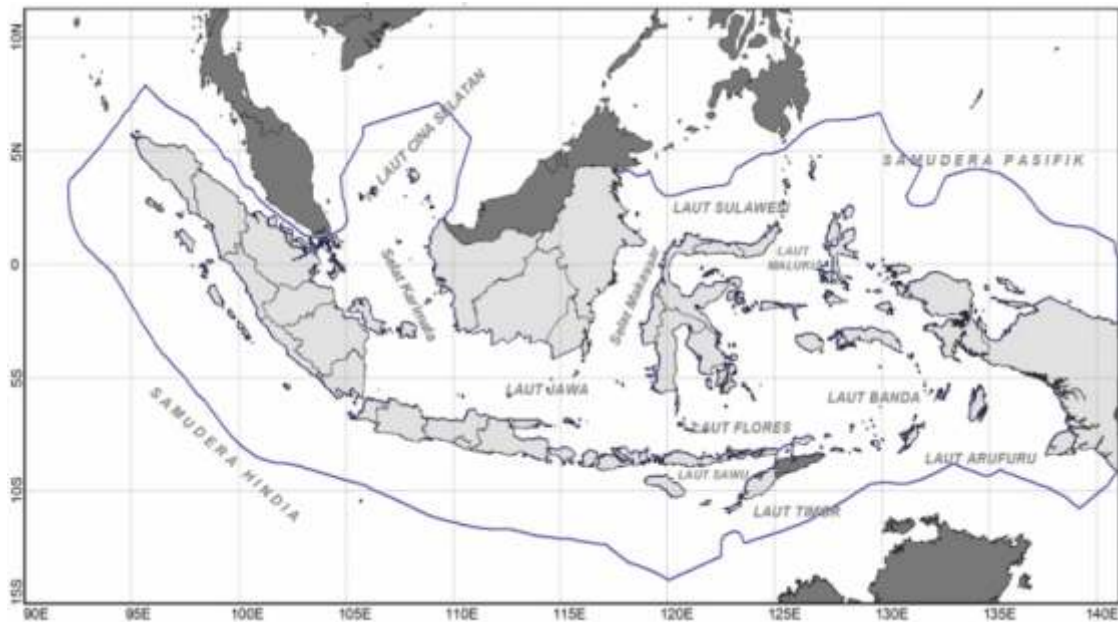
Perhitungan tinggi gelombang signifikan ditentukan berdasarkan hasil integrasi Persamaan 2 terhadap waktu secara numerik, yaitu [5]:

$$H_s = 2.83 \sqrt{\int_0^T \int_0^{2\pi} S(f, \theta) df d\theta} \quad (2)$$

Tinggi gelombang signifikan didefinisikan sebagai tinggi rata-rata 1/3 gelombang tertinggi, yang nilainya setara dengan tinggi gelombang hasil observasi visual [3]. Tinggi gelombang signifikan biasa di simbolkan dengan $H_{1/3}$ atau H_s .

2. Metode Penelitian

Wilayah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah perairan Indonesia dan sekitarnya pada posisi 12°LU–15°LS, 90°BT–141°BT (Gambar 1).



Gambar 1. Wilayah Penelitian

H_s diperoleh dari hasil luaran model Windwaves-05 yang di-*running* selama periode tahun 2010 dengan resolusi 1° , dengan data input model adalah data global angin permukaan di ketinggian 10 meter selama periode tahun 2010 dengan resolusi spasial 1° dan resolusi temporal 6 jam dari NCEP-NOAA [13]. Data observasi yang digunakan sebagai verifikator adalah H_s dari satelit altimeter gabungan (*merged*) (Jason-1, Envisat, Jason-2 dan Cryosat-2) melalui situs web www.aviso.oceanobs.com [6].

Tinggi gelombang signifikan luaran model Windwaves-05 dan data satelit altimeter AVISO ditampilkan secara spasial dengan menggunakan software MATLAB2010 untuk periode bulanan dan musiman pada tahun 2010. Periode musiman terdiri dari periode musim Desember-Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA) dan September-Oktober-November (SON). Kemudian, dihitung nilai korelasi H_s luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter AVISO [14] dan ditunjukkan dalam bentuk *scatter plot*. Selain itu, pola spasial bias (selisih) H_s luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter AVISO juga digambarkan untuk mengidentifikasi wilayah perairan yang prakiraan tinggi gelombangnya dari model Windwaves-05 lebih rendah atau lebih tinggi dari data observasi satelit altimeter.

Evaluasi dilakukan adalah dengan menghitung nilai korelasi, bias, dan kesalahan relatif antara tinggi

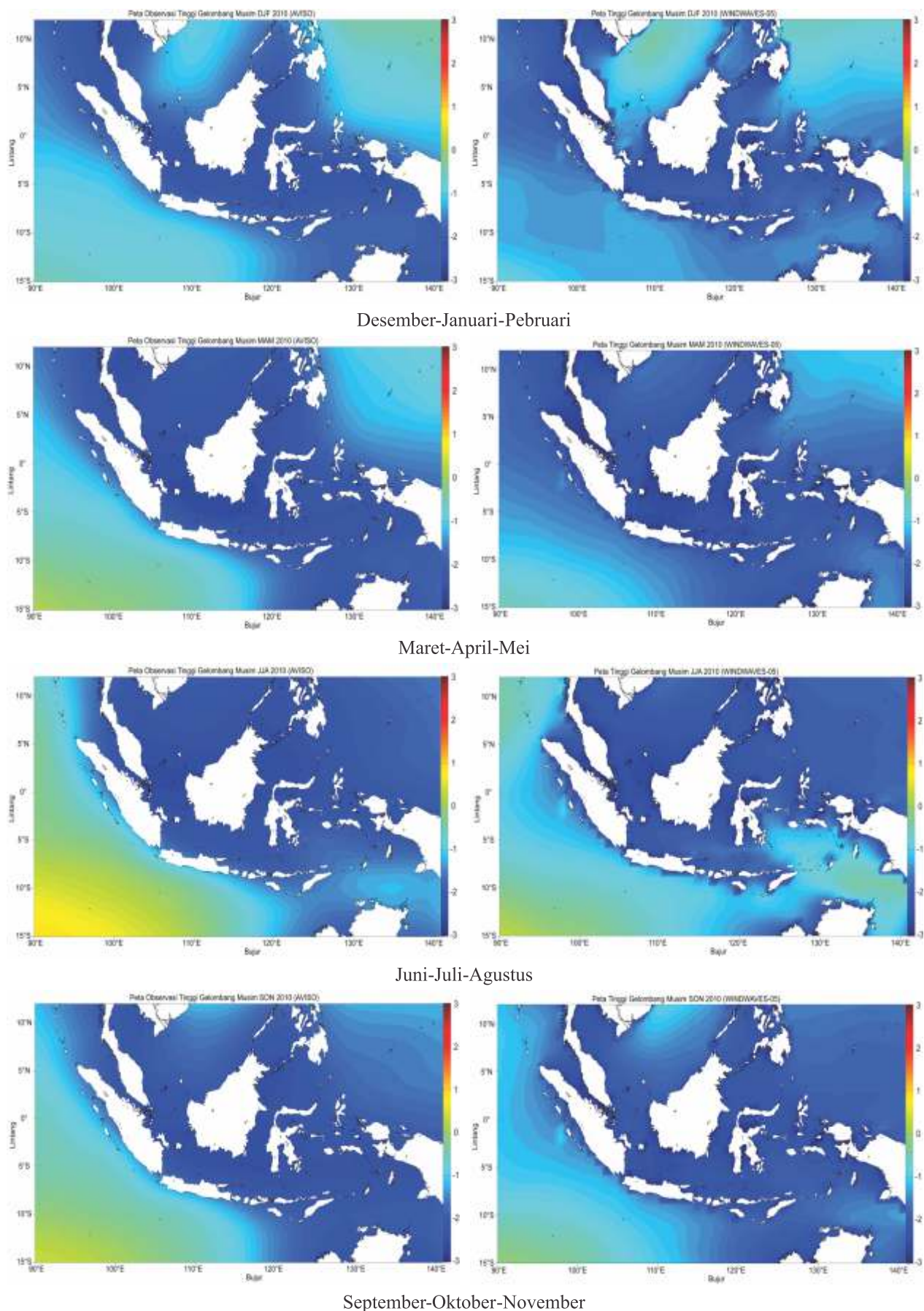
gelombang luaran model Windwaves-05 dan data satelit altimeter AVISO. Untuk nilai korelasi semakin mendekati 1 maka korelasi semakin mendekati sempurna [14,15], sedangkan nilai bias H_s dihitung berdasarkan selisih model Windwaves-05 dikurangi data satelit altimeter AVISO, dan untuk nilai kesalahan relatif dihitung dengan rumus sebagai berikut [16]:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{|x_o - x|}{x} \times 100\% \quad (3)$$

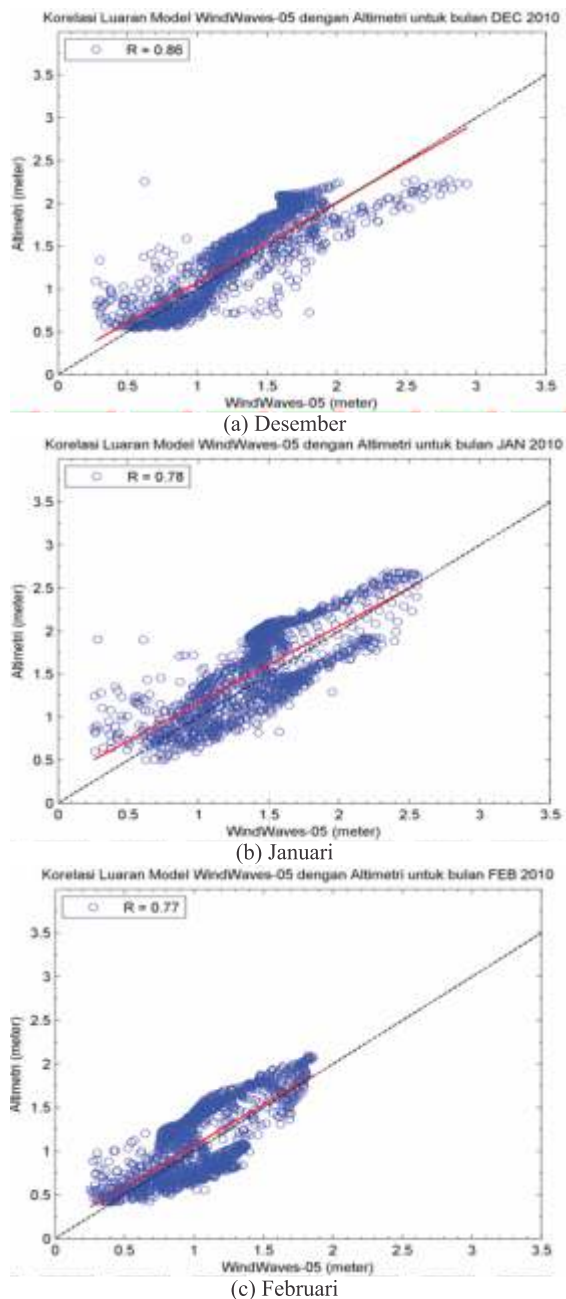
x adalah kesalahan relatif, x adalah Kesalahan absolut, x_o adalah data luaran model Windwaves-05 dan x adalah data satelit altimeter AVISO.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perbandingan H_s luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter untuk periode musiman memperlihatkan bahwa di wilayah perairan Samudra India, H_s dari model Windwaves-05 lebih rendah dari H_s satelit altimeter, sedangkan di Laut Cina Selatan dan Laut Arafuru, H_s dari model Windwaves-05 sedikit lebih tinggi dari H_s satelit altimeter. Secara spasial, hasil perbandingan pada umumnya menunjukkan pola yang serupa antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter (Gambar 2).



Gambar 2. Tinggi gelombang signifikan (H_s) dari satelit altimeter AVISO (kiri) dan luaran model Windwaves-05 (kanan) periode musiman tahun 2010.



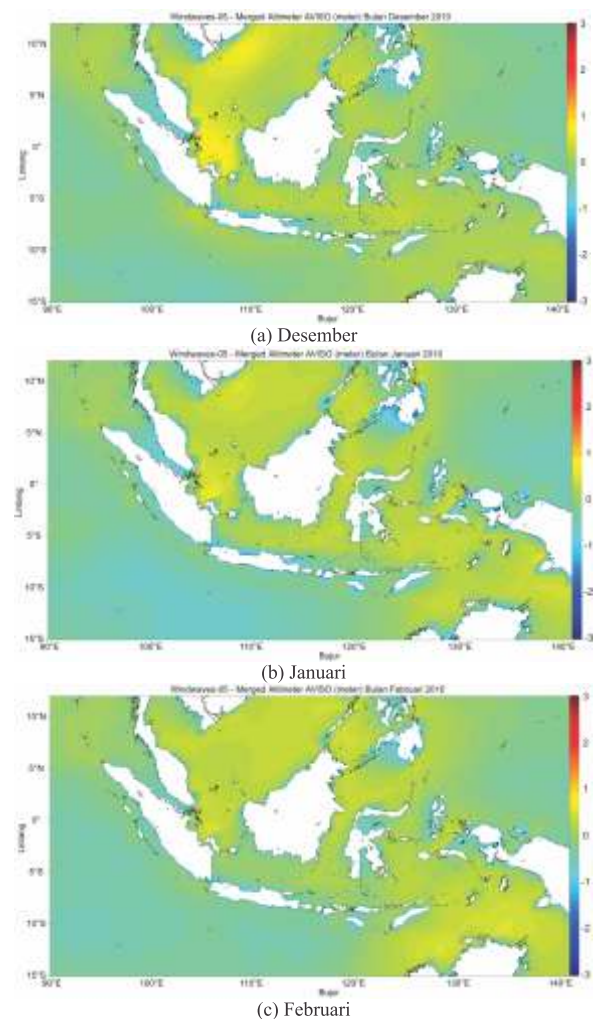
Gambar 3. Korelasi H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter AVISO Periode Desember-Januari-Februari (DJF) tahun 2010.

Hasil korelasi H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter gabungan (*merged*) AVISO periode bulanan tahun 2010 di perairan Indonesia dan sekitarnya ($12^{\circ}\text{LU}-15^{\circ}\text{LS}$, $90^{\circ}\text{BT}-141^{\circ}\text{BT}$) ditunjukkan dalam bentuk *scatter plot* pada Gambar 3, 5, 7 dan 9. Sedangkan pola spasial bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter gabungan AVISO ditampilkan pada Gambar 4, 6, 8 dan 10.

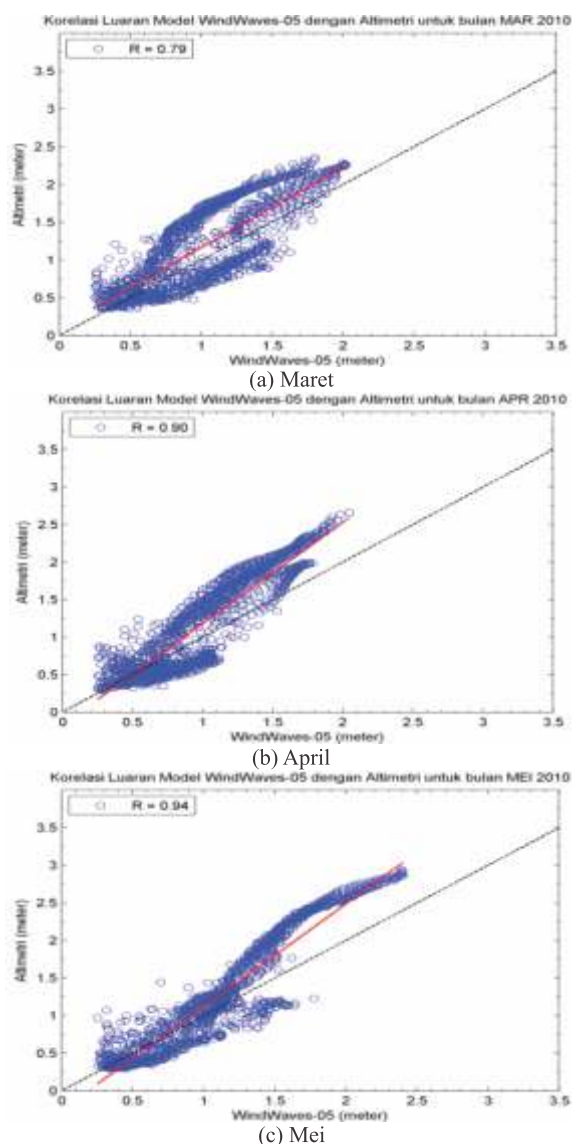
Nilai korelasi H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data observasi (Satelit *Merged* Altimeter AVISO) pada periode bulan Desember-Januari-Februari (DJF) ditampilkan pada Gambar 3. Pada bulan Desember, nilai koefisien korelasinya sebesar

0,86 (Gambar 3.a), pada bulan Januari, koefisien korelasinya menurun menjadi 0,78 (Gambar 3.b), sedangkan pada bulan Februari koefisien korelasinya sebesar 0,77 (Gambar 3.c).

Hasil pengurangan (bias) H_s luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter pada periode DJF menunjukkan secara umum model Windwaves-05 menghasilkan H_s yang lebih tinggi dari data H_s satelit altimeter di wilayah perairan Indonesia (Gambar 4). Nilai bias model Windwaves-05 di perairan Laut Jawa, Selat Makassar, Laut Sulawesi, Laut Banda, dan Laut Arafuru umumnya lebih tinggi dari satelit altimeter dengan nilai $\pm 0,3$ m, dan di Selat Karimata, juga lebih tinggi dengan bias sebesar $\pm 0,5$ m (dari perairan sekitar Kepulauan Riau sampai ke Laut Cina Selatan). Sedangkan di perairan sebelah selatan Jawa dan Sumatra serta Samudra Pasifik sebelah barat, luaran model Windwaves-05 lebih rendah daripada data satelit altimeter, yakni berkisar antara 0,2 – 0,5 m.



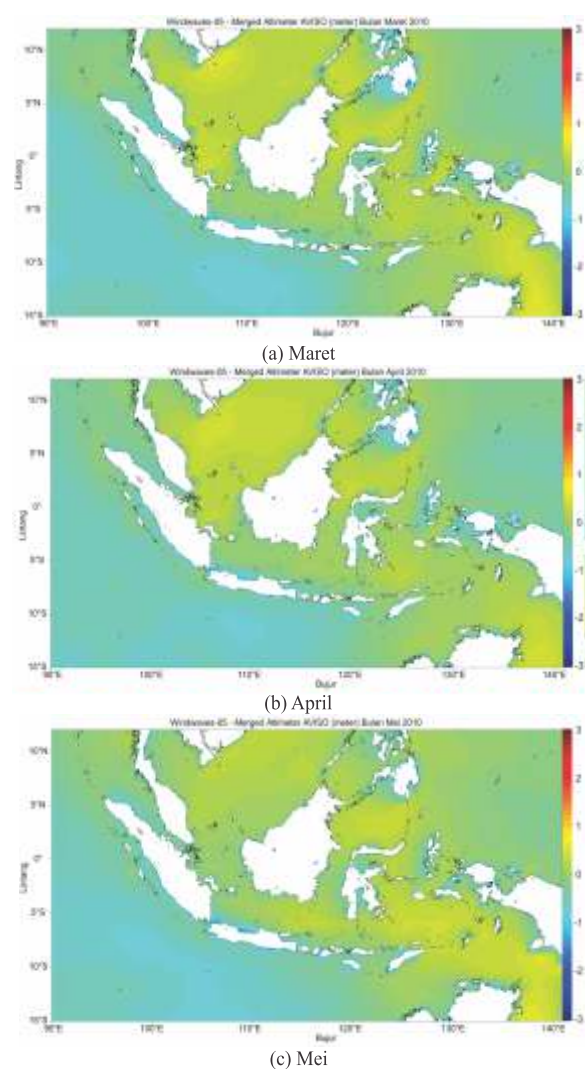
Gambar 4. Bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter AVISO (meter) Periode Desember-Januari-Februari (DJF) tahun 2010.



Gambar 5. Korelasi H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit *merged* altimeter AVISO periode Maret-April-Mei (MAM) tahun 2010.

Berdasarkan diagram *scatter plot* H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter pada periode bulan Maret-April-Mei (MAM) tahun 2010 yang ditunjukkan pada Gambar 5, diperoleh bahwa nilai korelasi pada bulan Maret sebesar 0,79 (Gambar 5a), sedangkan untuk nilai korelasi pada bulan April dan Mei lebih tinggi, yakni sebesar 0,90 pada bulan April (Gambar 5b), dan 0,94 pada bulan Mei (5c).

Pada periode bulan MAM (Gambar 6), diperoleh nilai bias H_s antara luaran model Windwaves-05 dan data satelit altimeter AVISO lebih rendah dibandingkan dengan periode bulan sebelumnya (DJF). Dari Gambar 6, menunjukkan bahwa di Laut Cina Selatan dan juga Laut Arafuru nilai bias H_s hasil model Windwaves-05 lebih tinggi daripada observasi satelit altimeter dengan selisih sekitar $\pm 0,3$ m, di Laut Sulawesi dan Laut Banda nilai bias H_s berkisar $\pm 0,2$ m, sedangkan di Laut Jawa dan Samudra Pasifik bagian Barat, antara model dengan



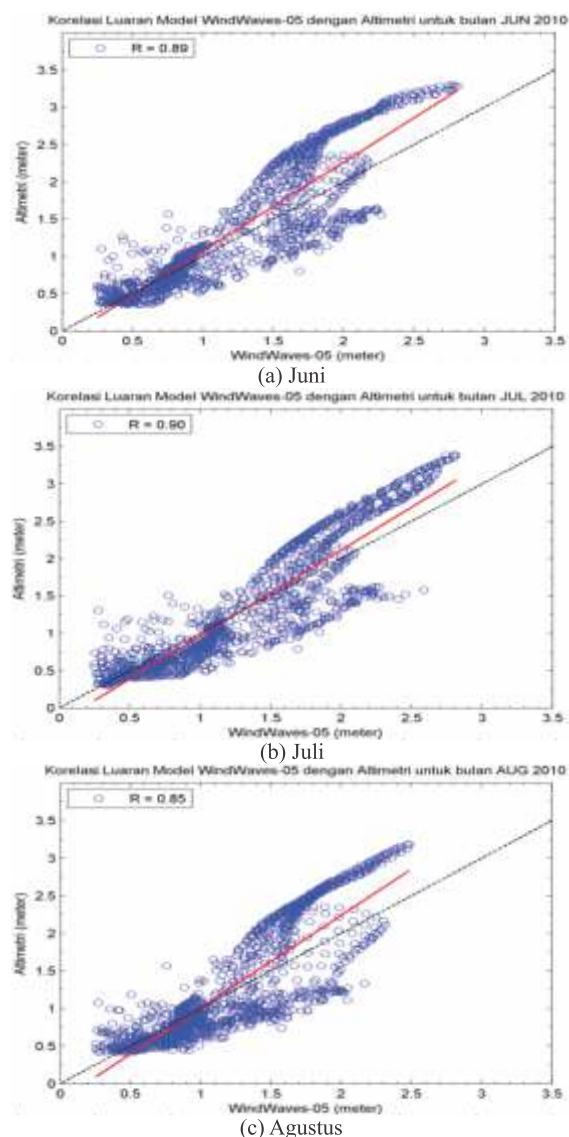
Gambar 6. Bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit *merged* altimeter AVISO (meter) periode Maret-April-Mei (MAM) tahun 2010.

pengukuran satelit altimeter nilai biasanya mendekati 0. Akan tetapi untuk Samudra India sebelah barat Sumatra sampai dengan selatan Jawa, luaran model menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan observasi.

Hasil luaran model pada bulan Maret menunjukkan adanya nilai H_s lebih tinggi dengan nilai sekitar $\pm 0,4$ m di Laut Cina Selatan dan Laut Arafuru, sedangkan di perairan sekitar Bangka Belitung menunjukkan hasil yang sama (Gambar 6.a). Kondisi ini berubah seiring dengan berubahnya waktu dimana pada bulan April (Gambar 6.b) di daerah tersebut biasanya semakin rendah dan semakin menurun pada bulan Mei (Gambar 6c). Begitu juga di Laut Sulawesi dan Selat Makassar serta perairan sekitar Maluku menunjukkan nilai H_s lebih tinggi dengan bias sekitar $\pm 0,2$ m pada bulan Maret dan berangsur menurun pada bulan April dan Mei. Pada bulan Maret, nilai H_s luaran model Windwaves-05 di Samudra India sepanjang Sumatra dan Jawa menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan observasi oleh satelit altimeter dengan bias sekitar $\pm 0,7$ m dan tertinggi di bagian selatan Jawa. Pada bulan April, nilai bias H_s antara luaran

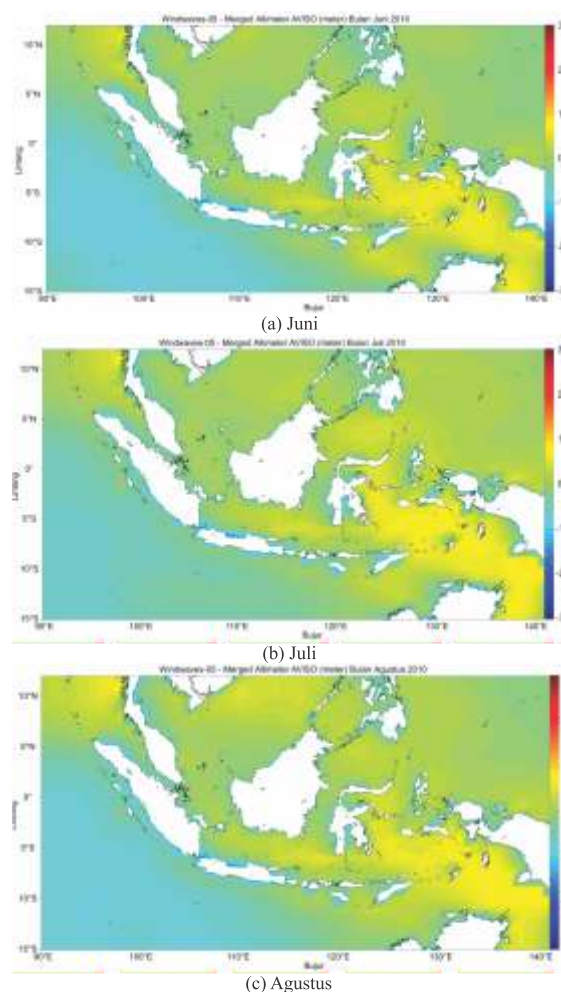
model dan observasi semakin berkurang dan tertinggi di selatan Jawa dengan nilai berkisar 0,5 m.

Hasil korelasi H_s antara model Windwaves-05 dengan satelit altimeter pada periode bulan Juni-Juli-Agustus (JJA) ditampilkan pada Gambar 7. Pada bulan Juni diperoleh nilai korelasi sebesar 0,89 (Gambar 7.a), pada bulan Juli memiliki nilai koefisien korelasi 0,90 (Gambar 7.b), sedangkan pada bulan Agustus koefisien korelasinya sebesar 0,85 (Gambar 7.c).

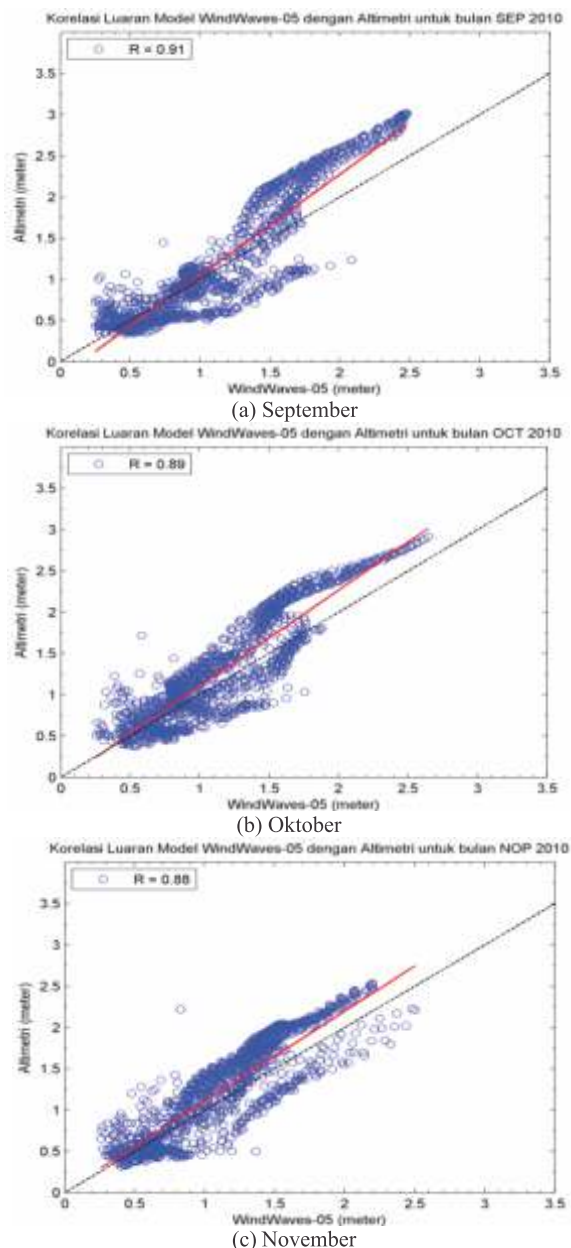


Gambar 7. Korelasi H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit *merged* altimeter AVISO periode Juni-Juli-Agustus (JJA) tahun 2010.

Nilai bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit *merged* altimeter AVISO pada periode musim Timur (Monsun Australia) mulai dari bulan Juni, Juli dan Agustus (Gambar 8) relatif sama dengan periode musim sebelumnya. Gambar 8 menunjukkan bahwa pada Laut Cina Selatan, Laut Jawa, Laut Banda, Laut Sulawesi dan Laut Banda, serta Laut Arafuru nilai H_s luaran model lebih tinggi daripada nilai H_s observasi satelit altimeter dengan selisih sekitar 0,2 sampai 0,8 m, sedangkan di perairan Samudra Pasifik bagian barat, nilai bias H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter sangat kecil (mendekati nol). Untuk wilayah perairan Samudra India sebelah barat Sumatra sampai dengan selatan Jawa, bias nilai H_s luaran model Windwaves-05 menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan satelit altimeter yakni sekitar $\pm 0,5$ meter.



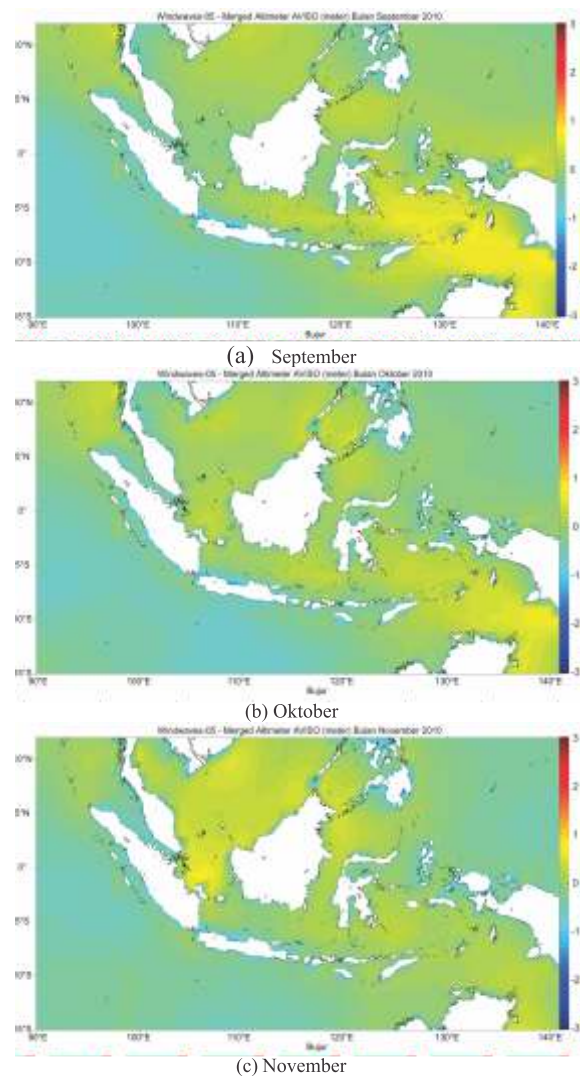
Gambar 8. Bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit *merged* altimeter AVISO (meter) periode Juni-Juli-Agustus (JJA) tahun 2010.



Gambar 9. Korelasi H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit merged altimeter AVISO periode September-Oktober-November (SON) tahun 2010.

Hasil korelasi H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter pada periode bulan September - Oktober - November diberikan pada Gambar 9. Pada bulan September diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,91 (Gambar 9.a), pada bulan Oktober memiliki nilai koefisien korelasi sebesar 0,89 (Gambar 9.b), sedangkan pada bulan November nilai koefisien korelasi sebesar 0,88 (Gambar 9.c).

Periode bulan September-Oktober-November (SON) ini merupakan musim peralihan menuju monsun Asia (Gambar 10), bias H_s antara luaran model Windwaves-05 dan data satelit altimeter AVISO lebih rendah dibandingkan dengan periode bulan DJF dan JJA. Di wilayah perairan Laut Cina Selatan sampai Laut Jawa,



Gambar 10. Bias H_s luaran model Windwaves-05 terhadap data satelit merged altimeter AVISO (meter) periode September-Oktober-November (SON) tahun 2010.

untuk bulan September-Oktober, nilai bias H_s luaran model Windwaves-05 sangat kecil dengan data satelit altimeter, demikian juga untuk wilayah perairan Laut Arafuru, pada bulan November, nilai bias H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter sangat kecil (Gambar 10c). Untuk wilayah di perairan Samudra Pasifik bagian barat, nilai bias H_s antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter pada bulan September-Oktober-November juga sangat kecil yakni mendekati nol, sedangkan untuk wilayah perairan Samudra India bagian barat Sumatra sampai dengan selatan Jawa, bias nilai H_s luaran Windwaves-05 menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan satelit altimeter yakni sekitar $\pm 0,5$ meter.

Tabel 1. Tabel Kesalahan Relatif Rata-rata Model Windwaves-05 terhadap Satelit Altimeter AVISO

	Kesalahan Relatif Rata-rata Bulan	Kesalahan Relatif Rata-rata Musim
Desember	15 %	21 %
Januari	21 %	
Februari	26 %	
Maret	30 %	26 %
April	25 %	
Mei	25 %	
Juni	25 %	25 %
Juli	22 %	
Agustus	28 %	
September	28 %	25 %
Oktober	26 %	
Nopember	20 %	
Rata-rata	24 %	

Nilai persentase kesalahan relatif rata-rata prediksi tinggi gelombang model Windwaves-05 terhadap satelit altimeter AVISO di perairan Indonesia dan sekitarnya (12°LU-15°LS, 90°BT-141°BT) bervariasi setiap bulannya (Tabel 1), untuk nilai kesalahan relatif rata-rata model Windwaves-05 yang paling rendah terdapat pada bulan Desember sebesar 15% dan pada musim DJF sebesar 21%, sedangkan nilai kesalahan relatif rata-rata tertinggi terjadi pada bulan Maret sebesar 30% dan pada musim MAM sebesar 26%. Nilai kesalahan relatif rata-rata luaran model terhadap observasi selama periode tahun 2010 adalah sebesar 24%, hasil ini dapat diartikan bahwa nilai deviasi prediksi tinggi gelombang model adalah $\pm 24\%$, jika nilai tinggi gelombang (H) model adalah 1 meter, maka *range* untuk nilai H observasinya adalah antara 0,74 - 1,24 meter.

Hasil model di Laut Cina Selatan, Selat Karimata dan Laut Jawa bagian barat lebih tinggi dari data satelit AVISO pada bulan DJF, sebaliknya di Laut Banda, Arafuru dan Laut Jawa bagian Timur lebih tinggi pada bulan JJA. Hal ini juga terjadi pada penelitian Sofian (2010) [17] yang menggunakan model WAVEWATCH-III. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang tinggi, dimana pada bulan DJF kecepatan angin lebih tinggi di sebelah utara ekuator, sedangkan bulan JJA di bagian selatan, model mengalami *over estimate*. Ada dua kemungkinan yang menyebabkan kejadian ini. Pertama parameterisasi interaksi *nonlinear* pada model Winwave-5 mengalami *over estimate* pada kecepatan angin yang tinggi. dan yang kedua adalah *drag coefficient* (C_d) yang terlalu besar. Penelitian Perrie (2010) [18], dan Tolman (2013) [19] menunjukkan bahwa penentuan metode perhitungan interaksi *nonlinear* ini menentukan keakuratan hasil simulasi model, pada kecepatan angin yang tinggi perhitungan interaksi ini umumnya menghasilkan nilai yang lebih tinggi, sedangkan Moon *et. al* (2004) [20] menjelaskan bahwa nilai *drag coefficient* yang diaplikasikan pada model umumnya menghasilkan nilai yang lebih tinggi pada kecepatan angin yang tinggi.

Dari hasil verifikasi antara luaran model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter AVISO, nilai korelasi yang diperoleh selama tahun 2010 diatas 0,7 dengan prosentase kesalahan relatif rata-rata sebesar 24%. Hasil ini menunjukkan bahwa model gelombang Windwaves-05 mempunyai performa yang cukup baik untuk dapat digunakan sebagai model prakiraan tinggi gelombang laut di perairan Indonesia. Hasil penelitian ini juga memperkuat hasil riset sebelumnya, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Suratno [5], dimana model Windwaves-05 diverifikasi dengan data pengamatan pada kapal yang hasilnya juga menunjukkan hasil yang cukup baik (Tabel 2).

Tabel 2. Analisis korelasi luaran model Windwaves-05 terhadap data observasi kapal [5]

Tanggal 11-30 Januari 1996						
Jangka prakiraan	Periode signifikan			Tinggi signifikan		
	Deviasi rata-rata (detik)	RMSE	Korelasi	Deviasi rata-rata (meter)	RMSE	Korelasi
<i>Hindcast</i>	0,74	1,62	0,645	-0,6	0,89	0,735
Prakiraan 24 jam	0,67	1,63	0,621	-0,6	0,95	0,667
Prakiraan 48 jam	0,64	1,64	0,601	-0,7	1,00	0,614
Tanggal 21-30 Agustus 1996						
Jangka prakiraan	Periode signifikan			Tinggi signifikan		
	Deviasi rata-rata (detik)	RMSE	Korelasi	Deviasi rata-rata (meter)	RMSE	Korelasi
<i>Hindcast</i>	0,74	1,63	0,656	-0,3	0,695	0,736
Prakiraan 24 jam	0,79	1,67	0,628	-0,3	0,711	0,714
Prakiraan 48 jam	0,79	1,69	0,612	-0,3	0,803	0,615

4. Kesimpulan

Hasil perbandingan luaran model Windwaves-05 dengan satelit altimeter AVISO di perairan Indonesia dan sekitarnya, menunjukkan bahwa model gelombang Windwaves-05 mempunyai performa yang cukup baik dengan nilai korelasi yang tinggi pada semua bulan, nilai korelasi terendah sebesar 0,77 diperoleh pada bulan Februari dan nilai korelasi tertinggi pada bulan Mei (0,94). Nilai bias absolut bervariasi 0,2 – 0,8 m, bias gelombang tertinggi (0,8 meter) terdapat di perairan Selat Karimata yang terjadi pada bulan Desember, dan pada beberapa wilayah di perairan Laut Arafuru pada bulan Juli Agustus dengan kesalahan relatif rata-rata model Windwaves-05 terhadap data satelit altimeter AVISO sebesar 24%. Hasil verifikasi antara model Windwaves-05 dengan data satelit altimeter AVISO menunjukkan bahwa model Windwaves-05 mempunyai performa yang cukup baik untuk dijadikan sebagai model prakiraan tinggi gelombang laut di perairan Indonesia.

Untuk penelitian selanjutnya terkait dengan verifikasi model gelombang Windwaves-05 disarankan agar diverifikasi juga dengan data observasi seperti dengan data *buoy* untuk lebih mengetahui performa dari model Windwaves-05. Selain itu, dalam rangka meningkatkan akurasi hasil model perlu kiranya penelitian lebih lanjut tentang parameterisasi interaksi *nonlinear* dan *drag coefficient stres* angin pada model tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Dephub. (2009). Laporan Akhir Kajian Analisis Trend kecelakaan transportasi Laut 2003-2008. (http://www.dephub.go.id/knkt/ntsc_maritime/Laut/Publications/Laporan%20Analisis%20Trend%20Kecelakaan%20Laut%202003-2008.pdf), diakses tanggal 20 Januari 2012.
- [2] World Meteorological Organization (WMO). (2001). *Guide the marine Meteorological Services, Third edition*, WMO no.471. Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [3] World Meteorological Organization (WMO). (1998). *Guide to Wave Forecasting and Analysis*, WMO-No. 702, Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [4] Peter A.E.M. Janssen. (2008). Progress in ocean wave forecasting. *Journal of Computational Physics* 227, 3572–3594.
- [5] Suratno. (1997). *Model Numerik Prakiraan Gelombang Permukaan laut untuk Perairan Indonesia dan Sekitarnya*. Tesis, Fakultas MIPA: Universitas Indonesia.
- [6] Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO). July, 2011. *Gridded Wind/Wave products*. (<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/mswhmwind/index.html>).
- [7] Suratno. (2004). *Panduan Operasional WIND WAVES-04*. Pusat Informasi Meteorolog Penerbangan dan Maritim: BMKG. Jakarta.
- [8] Ueno, K. and Kohno, N. (2004). *The Development of Third generation wave Model MRI-III*. The 8 th International workshop on wave hindcasting. Ohaua, Hawaii.
- [9] Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean wave*. New York: Elsevier.
- [10] Tolman, H.L. (2002), Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III, *Parallel Computing*. 28. 35-52.
- [11] Hasselmann, K. (1963), On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum, Part 2. Conservation theorems; wave-particle analogy; irreversibility. *Journal of Fluid Mechanics*, 15 (2): 273–281.
- [12] BMKG (2013). *Pengembangan Model Bidang Meteorologi Maritim “Wave Model Generasi III”*. Laporan Penelitian. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- [13] National Center for Environmental Prediction (NCEP), NOAA. NCEP Operational Data (WRF inputs): 1-degree FNLs. (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free_data.html), di akses bulan Juni 2011.
- [14] Supranto, J. (2002). *Statistik Teori dan Aplikasi*. Edisi 7. Jakarta: Erlangga.
- [15] Sugiyono. (2007). *Metode Penelitian Administrasi*. Bandung: Alfabeta.
- [16] Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (Eds.). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th printing. New York: Dover, p. 14, 1972. (<http://mathworld.wolfram.com/RelativeError.html>), diakses tanggal 23 Desember 2013.
- [17] Sofian, I & Wijanarto, A. B., (2010) Simulation of significant wave height climatology using WAVEWATCH-III. *International Journal of Geoinformatics*. Vol. 6, No. 4. p. 13-19
- [18] Perrie, W., Susilo, A. & Toulany, B. (2010). A new approximation for nonlinear wave-wave interaction. *Ocean Modell*. Vol. 33, p 159-176.
- [19] Tolman, H. L. & Grumbine, R. W. (2013) holistic genetic optimization of a Generalized Multiple Discrete Interaction Approximation for wind waves. *Ocean Modell*.
- [20] Moon, I. J., Ginis, I. & Hara, T. (2004). Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 61, p 2334-2348.