

PEMANFAATAN SATELIT ALTIMETRI UNTUK VERIFIKASI TINGGI GELOMBANG LAUT SIGNIFIKAN PADA OCEAN FORECAST SYSTEM (OFS) – BMKG

VERIFICATION OF SIGNIFICANT WAVE HEIGHT OCEAN OF FORECAST SYSTEM (OFS)–BMKG USING ALTIMETRY SATELLITE

Eko Supriyadi

Pusat Meteorologi Maritim BMKG, Jl. Angkasa No2, Kemayoran, Jakarta, 10720

*E-mail: eko.supriyadi@bmkgo.id

Naskah masuk: 13 Agustus 2018; Naskah diperbaiki: 04 Maret 2019; Naskah diterima: 14 Maret 2019

ABSTRAK

Sistem OFS-BMKG yang sudah beroperasi sejak akhir tahun 2016 belum banyak dilakukan verifikasi secara menyeluruh di perairan Indonesia. Sistem ini sendiri dikembangkan dari model WaveWatch III (WW3). Penelitian ini melakukan kajian verifikasi tinggi gelombang laut signifikan (SWH) dari sistem OFS menggunakan pengamatan satelit altimetri untuk periode Januari 2017. Verifikasi dilakukan dengan menyesuaikan posisi SWH yang diperoleh dari lintasan satelit altimetri terhadap kontur model WW3 pada grid yang sama. Hasil analisis statistika menunjukkan nilai koefisien korelasi SWH antara hasil model dengan pengamatan satelit tergolong baik, yaitu sebesar 0,64. Sedangkan untuk uji bias, RMSE, dan SI masing-masing bernilai 0,41; 0,89; dan 0,52. Berdasarkan hasil plot *time series* dan sebaran data SWH setiap waktu pengamatan menunjukkan bahwa hasil sistem OFS lebih tinggi dibandingkan pengamatan satelit altimetri. Sehingga dibutuhkan penyesuaian model WW3 agar lebih mendekati dengan observasi.

Kata kunci: Altimetri, Verifikasi, SWH, OFS

ABSTRACT

The OFS-BMKG system has been operating since the end of 2016 but has not been verified in Indonesian waters. This system was developed from the WaveWatch III (WW3) model. This study was conducted to verify OFS Significant Wave Height (SWH) against satellite altimetry measurements for the period of January 2017. The verification was performed by adjusting the position of SWH obtained from the altimetry satellite path to the contour of the WW3 model for the same grids. The results showed that the OFS SWH had good accordance with the satellite measurement. The correlation coefficient was 0,64 while bias, RMSE, and SI values were 0,41; 0,89; and 0,52, respectively. The time series and data distribution showed that OFS SWH in general had higher values than that measured by altimetry satellite. Adjustments or fine-tuning therefore are required for the WW3 model results to match actual observations.

Keywords: Altimetry, Verification, SWH, OFS

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki panjang garis pantai terbesar ke dua di dunia setelah Kanada [1]. Hal ini memiliki pengaruh langsung terhadap daerah pesisir mengenai potensi kebaharian yang dapat dimanfaatkan. Penelitian yang telah dilakukan oleh UNCTAD [2] menunjukkan sekitar 80% perdagangan dunia semuanya melalui laut dan setengah dari populasi penduduk dunia berada di wilayah pesisir [3]. Salah satu fenomena di lautan yang memiliki pemanfaatan tinggi bagi manusia adalah tinggi gelombang laut yang nilainya berbeda dalam setiap lokasi dan waktu. Dikatakan memiliki pemanfaatan tinggi

sebab setiap kejadian gelombang laut dapat mempengaruhi semua aspek kegiatan yang berada di daerah pesisir.

Sehingga sangat menarik bila dilakukan pengukuran dan pengamatan gelombang laut di wilayah perairan Indonesia. Akan tetapi tidak semua gelombang laut dapat diamati untuk diambil manfaatnya bagi manusia. Gelombang laut yang banyak berperan dalam pengaruhi aktivitas manusia adalah tinggi gelombang laut signifikan. Tinggi gelombang laut signifikan sebagaimana dipahami secara global merupakan tinggi sepertiga dari tinggi gelombang maksimum [4]. Dalam praktiknya pengamatan gelombang laut umumnya dilakukan secara *in situ*

dalam skala pengamatan yang terbatas [4]. Namun hal tersebut tidak bisa dilakukan mengingat luasnya perairan Indonesia dan tidak mungkin dilakukan di banyak lokasi. Hal ini tentunya membutuhkan banyak tenaga, waktu dan biaya tinggi dalam mengamati karakteristik gelombang laut.

Solusi dari permasalahan tersebut dapat didekati dengan dua cara yaitu, penginderaan jauh dan pemodelan. Penginderaan jauh dapat dilakukan sebagai pengganti pengamatan *in situ* sebab dapat menghasilkan data yang luas dalam sekali pengamatan [5]. Sedangkan pemodelan lebih cenderung menggunakan pendekatan matematis dalam prakiraan sehingga akurasi cenderung rendah [6].

Namun demikian metode penginderaan jauh tidak selalu memiliki kelebihan yang positif. Khususnya penginderaan jauh yang menggunakan satelit altimetri untuk pengamatan arah-kecepatan angin dan gelombang laut. Hal ini disebabkan prinsip kerja dari sensor satelit altimetri adalah “menyapu” perairan dengan memancarkan pulsa yang sangat pendek mengakibatkan segala perubahan dinamika perairan yang tidak semuanya direkam oleh satelit ini [7]. Namun tidak berarti tanpa kelebihan, dengan menggabungkan satelit altimetri seperti SARAL dan CryoSat-2 mampu mengurangi error pengukuran gelombang dengan observasi [8]. Tidak hanya itu pengamatan dengan satu satelit altimetri atau lebih mampu memberikan informasi tinggi gelombang dengan cakupan yang padat [9].

Data satelit altimetri ini sebenarnya sudah tersedia sejak tahun 1980-an akan tetapi dalam perjalanannya masih membutuhkan pengolahan lanjutan agar dapat dipakai untuk keperluan analisis. Hal ini menjadi tantangan tersendiri sebab mau tidak mau harus dikembangkan teknik tersendiri agar data yang dihasilkan dapat digunakan lebih lanjut. Beberapa referensi menunjukkan sedikit sekali satelit altimetri digunakan sebagai alat verifikasi suatu model [10,11].

Beberapa penelitian lebih cenderung membandingkan data *in situ* dengan satelit altimetri pada berbagai skala. Sebagai contoh satelit altimetri China HY-2A memperoleh RMSE dan bias SWH yang cukup baik untuk periode 2011-2016 masing-masing sebesar 0,215 m dan 0,117 m dibandingkan dengan pengukuran bouy [11]. Selain itu pengamatan SWH dengan satelit SARAL sepanjang pantai India dengan membandingkan hasilnya terhadap bouy memberikan error, SI, dan korelasi masing-masing sebesar 0,36 m, 26% dan 91% [12]. Hal yang sama juga dilakukan oleh Sepúlveda [13] yang menemukan pengamatan SWH pada setiap

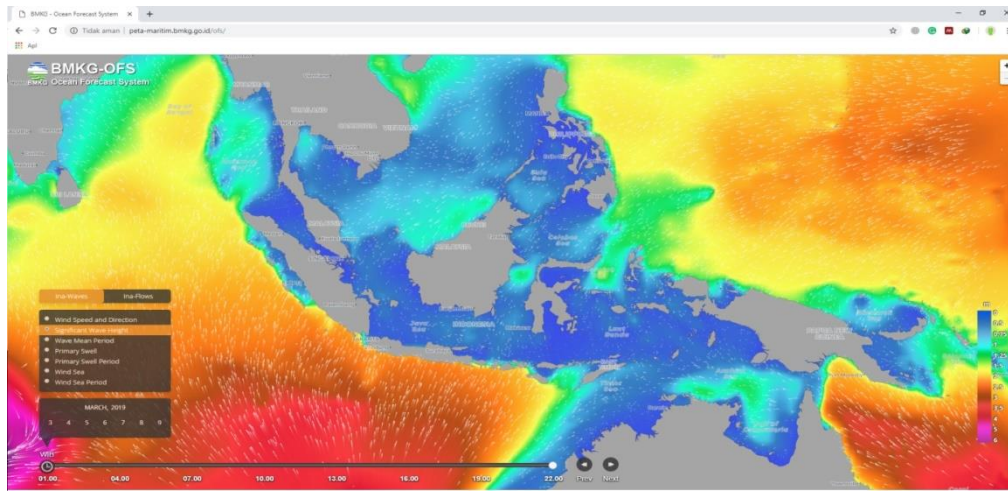
lintasan satelit SARAL lebih akurat daripada pengukuran bouy di lautan terbuka.

Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah teknik dalam memverifikasi gelombang laut antara data model dengan pengamatan satelit altimetri. Penelitian yang dilakukan oleh Appendini [14,15,16] menyajikan suatu konsep verifikasi gelombang laut yang berbeda dari teknik-teknik sebelumnya. Pada penelitian tersebut dibandingkan data hasil model dengan data hasil “sisiran” altimetri bersesuaian dengan jalur satelit itu berada. Hanya saja dalam penerapan metodenya masih membutuhkan langkah panjang dalam membuat kelompok waktu parameter fisis yang diamati ke dalam koordinat struktur grid yang digunakan dan juga membutuhkan bantuan perangkat lunak lebih dari satu.

Pusat Meteorologi Maritim pada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (Pusmetmar BMKG) yang terbentuk pertengahan tahun 2016 sudah memiliki sistem pemodelan cuaca maritim yang diterapkan sejak akhir tahun 2016 termasuk didalamnya penentuan tinggi gelombang laut signifikan. Sistem tersebut dinamakan sebagai OFS (*Ocean Forecast Sistem*) dan masih beroperasi hingga saat ini (Gambar 1). Model yang digunakan merujuk kepada WaveWatch III (WW3), yaitu sebuah model gelombang generasi ke-3 yang dikembangkan oleh *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) bagian dari NOAA. Namun hingga kini belum pernah dilakukan proses verifikasi terhadap model tersebut. Hal ini tentunya menjadi tantangan tersendiri mengingat produk yang dihasilkan dari sistem tersebut banyak digunakan sebagai produk layanan prakiraan cuaca maritim di seluruh Indonesia.

Penginderaan jauh melalui satelit altimetri diharapkan dapat memverifikasi produk yang dihasilkan oleh sistem OFS – BMKG. Teknik ini diambil mengingat luas perairan Indonesia yang tidak memungkinkan melakukan verifikasi secara *in situ* [17]. Selain itu frekuensi lintasan satelit altimetri yang melintas di perairan Indonesia tergolong tinggi. Hal ini tentunya menjadi keuntungan dalam memanfaatkan satelit altimetri.

Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini bertujuan kepada tiga hal: Pertama, menampilkan tinggi gelombang laut signifikan yang dihasilkan dari satelit altimetri. Kedua, membandingkan tinggi gelombang laut signifikan dari keluaran OFS-BMKG terhadap pengamatan satelit. Ketiga, melakukan verifikasi tinggi gelombang laut signifikan produk hasil sistem OFS – BMKG terhadap pengamatan satelit menggunakan pendekatan statistik.



Gambar 1. Tampilan peta gelombang signifikan pada sistem OFS – BMKG.

2. Metode Penelitian

Data. Penelitian dilaksanakan di Perairan Indonesia dan sekitarnya dalam batas koordinat $90^{\circ} - 145^{\circ}$ BT, 15° LU – 15° LS. Data SWH yang digunakan bersumber dari data satelit dan data render model WW3, keduanya berformat nc. Data satelit diperoleh dari <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves/data/2017/01/> selama bulan Januari 2017. Dipilihnya bulan ini didasarkan pada ketersediaan data yang utuh dari bulan lainnya sehingga mampu menghasilkan verifikasi yang baik. Data satelit ini merupakan data level 2 (L2P) yang sudah mengalami kualitas kontrol untuk menghasilkan data yang sudah benar-benar homogen. Resolusi spasial dan temporal satelit altimetri adalah bersifat real pengamatan dimana kedua resolusi tersebut bersifat presisi berdasarkan sapuan sensor satelit. Kedua, data input sistem OFS BMKG yang bersumber dari <http://peta-maritim.bmkg.go.id/render/>. Resolusi spasial dan temporal model WW3 pada sistem OFS ini bernilai $1/16^{\circ}$ ($0,0625^{\circ}$) dan 3 jam-an yaitu 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, dan 21. Selanjutnya waktu tiap 3 jam-an ini disebut sebagai waktu utama.

Metode. Data SWH pada penjelasan bagian atas merupakan gabungan dari beberapa satelit altimetri yang pengamatannya menggunakan teknik *along-track mono-mission* dari satelit Jason 2, Cryosat, dan SARAL. Teknik ini merekam nilai SWH sepanjang lintasan satelit dan menyajikan nilai yang terkoreksi sehingga dapat langsung diaplikasikan dalam perhitungan. Bila dilihat secara harian hanya beberapa satelit altimetri yang melintasi perairan Indonesia maka diputuskan untuk menggunakan data dari seluruh ketiga satelit tersebut. Hal ini bertujuan untuk memberikan cakupan wilayah pengamatan yang rapat dan menghasilkan jumlah data yang cukup untuk proses perhitungan selanjutnya.

Data satelit altimetri bekerja dengan menyisir wilayah di bawahnya berdasarkan siklus (*cycle*) dan lintasan (*pass*) sehingga menghasilkan data lokasi (bujur dan lintang) yang tidak konstan setiap waktu. Untuk itu dibutuhkan pembuatan grid (struktur grid) dimana setiap rentang koordinat diberi penomoran indeks grid. Metode pembuatan grid ini memberikan dua keuntungan sendiri, yaitu proses pengolahan jauh lebih cepat dan kontur yang dihasilkan jauh lebih baik untuk analisa selanjutnya. Pada penelitian ini ukuran grid yang digunakan adalah $0,5^{\circ}$.

Setelah ditentukan nilai grid pada data satelit, selanjutnya dilakukan pengaturan koordinat dan waktu dengan langkah-langkah berikut:

1. Pengaturan koordinat data satelit
Pada tahapan ini, pengaturan koordinat bujur (*longitude*) mengikuti rumus:

$$lon_{(n+1)} = lon_{min} + \sum_{n=0}^a 0.5n$$

dengan $a = \frac{lon_{max} - lon_{min}}{0.5}$ (1)

untuk nilai n dari 0 hingga $a-1$, nilai-nilai koordinat satelit altimetri dikumpulkan menjadi satu rentang nilai dengan memenuhi persamaan:

$$lon_{n+1} \leq x < lon_{n+2} = n + 1$$
 (2)

Metode ini membuat perhitungan jauh lebih cepat dan efisien terutama bila dilakukan pada wilayah yang luas. Hal yang sama dilakukan pada bagian lintang (*latitude*).

2. Pengaturan waktu data satelit

Sebelumnya diketahui bahwa input waktu OFS BMKG bernilai 3 jam sekali untuk semua parameter model. Sehingga metode pengaturan waktu yang dilakukan disini adalah memasukkan semua pengukuran satelit pada saat 1,5 jam sebelum dan

sesudah waktu utama. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa data dari satelit masuk ke dalam bagian waktu utama. Setelah dilakukan pengelompokkan, setiap waktu utama tadi diberi nomor urut dari angka 1 hingga selesai menyesuaikan dengan waktu utama versi lengkapnya. Hal ini penting sebab satelit altimetri hanya merekam parameter fisis perairan saja dengan mengabaikan pengamatan di daratan.

3. Pengaturan grid pada model

Berbeda dengan pengaturan grid pada data altimetri yang ditujukan untuk mengelompokkan koordinat dan data ke nilai grid tertentu. Pemakaian grid pada model menyesuaikan dengan grid yang dihasilkan pada pengolahan data altimetri. Pengaturan grid pada model ditujukan untuk menghasilkan gambar dan plot data yang lebih halus ketika di tumpang tindih dengan lintasan satelit. Diketahui grid awal pada OFS BMKG sebesar 0,0625 dan akan dilakukan interpolasi menuju grid yang baru sebesar 0,01. Pemilihan nilai 0,01 ini didasarkan kepada kemampuan komputer tersedia agar cepat melakukan perhitungan. Namun tidak menutup kemungkinan memperkecil nilai grid model agar diperoleh rentang data akurat dan kontur peta yang lebih halus. Persamaan interpolasi yang digunakan mengikuti persamaan:

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (3)$$

Dimana:

x dan $f_1(x)$ adalah titik yang ingin dicari melalui interpolasi

x_0 dan $f(x_0)$ adalah titik pertama yang diketahui

x_1 dan $f(x_1)$ adalah titik kedua yang diketahui

4. Pengaturan koordinat data model

Prinsip utamanya sama pada point 1, hanya saja karena waktu utamanya sudah kelipatan 3 maka jumlah koordinat yang dihitung menyesuaikan dengan panjang waktu dari model.

5. Pengaturan waktu data model

Pada sistem OFS BMKG, data SWH yang digunakan di-update setiap jam 00 UTC dan 12 UTC. Perbedaan keduanya terletak dari waktu input keluaran WW3 yang selisih 12 jam. Data diambil pada penelitian ini hanya pada jam 00 UTC yang berisikan data prakiraan selama 7 hari ke depan. Sehingga dalam pengolahannya cukup diambil 8 pengamatan data saja. Dimana setiap pengamatan data mewakili 3 jam sehingga sesuai dengan satu hari pengamatan. Sisanya diabaikan karena merupakan prediksi untuk 6 hari kedepan. Disini tidak perlu dilakukan pengaturan waktu sebab data pada sistem OFS yang akan dibandingkan sudah dalam interval 3 jam.

Setelah langkah di atas dilakukan dengan baik maka akan diperoleh dua data SWH utama, yaitu data SWH yang berasal dari altimetri dan dari sistem OFS yang siap di tumpang tindihkan dalam satu peta. Perlu diketahui dalam proses tumpang tindih, maksimal akan menghasilkan 8 jenis peta kontur verifikasi. Jumlah ini mewakili waktu 3 jam-an dalam satu hari dimana hasilnya tergantung dari pengamatan satelit altimetri yang melintas di atas perairan Indonesia.

Analisis Statistika. Bila data altimetri dan model sudah disamakan angkah selanjutnya adalah verifikasi dengan menggunakan rumus statistika yang ada [18]:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i) \quad (4)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - o_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$SI = \frac{RMS}{\bar{o}} \quad (6)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(m_i - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}} \quad (7)$$

dimana:

- RMS = Root Mean Square (akar kuadrat rata-rata;
- SI = Scattered Index atau indek sebaran;
- CC = Coeficient Correlation atau koefisien korelasi;
- m_i = hasil model OFS-BMKG;
- o_i = pengukuran satelit altimetri;
- $\bar{m}$ = rata-rata hasil model OFS-BMKG;
- $\bar{o}$ = rata-rata pengukuran satelit altimetri.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini mengambil lokasi pengamatan tinggi gelombang laut signifikan pada perairan Indonesia dan sekitarnya. Pengamatan dilakukan menggunakan satelit altimetri pada saluran Ku (panjang gelombang 2,5-1,67 cm dan frekuensi 12-18 GHz) dan saluran C (panjang gelombang 7,5-3,75 cm dan frekuensi 4-8 GHz). Hasil dari deskripsi data satelit altimetri yang berformat nc menunjukkan bahwa data SWH berada pada level 2 (L2P) dengan nilai kategori kualitas pengukuran baik. Menurut panduan yang dibuat GlobWave [19], data L2P pada

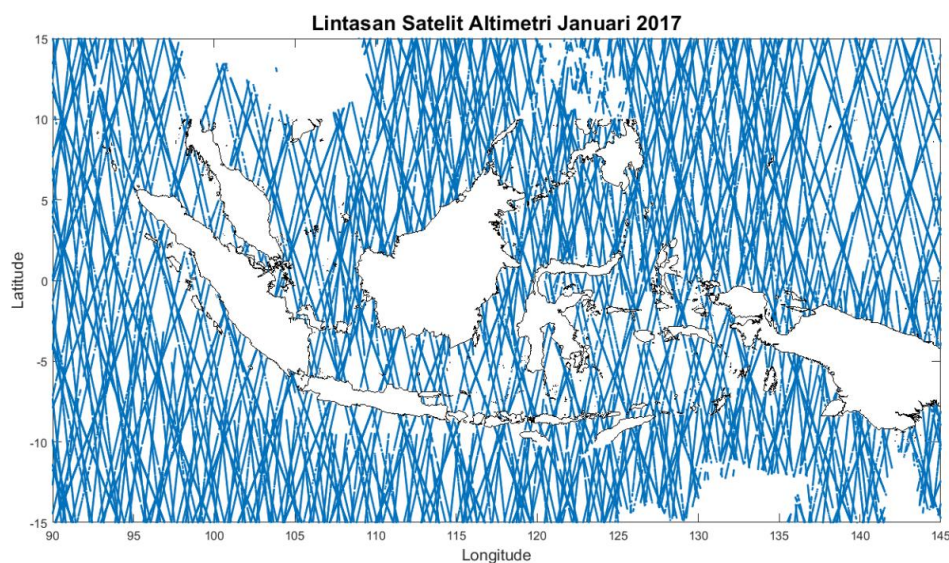
satelit altimetri sudah mengalami kalibrasi ulang parameter, uji kualitas data, dan menghilangkan spektrum non-linier sehingga dapat langsung digunakan dalam perhitungan.

Komposit lintasan satelit altimetri di atas kepulauan Indonesia bulan Januari 2017 disajikan pada Gambar 2. Data yang ditampilkan mengandung 248 lintasan satelit dengan 127.713 titik pengamatan. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa waktu lintasan satelit yang melintas berbeda-beda setiap lokasinya. Namun untuk mempermudah perhitungan, lintasan satelit yang ditampilkan disini sudah disesuaikan tiap pertiga jam artinya siap dibandingkan dengan data hasil model. Sehingga bila dijabarkan lintasan satelit dimulai dari 1 Januari 2017 pukul 00 UTC hingga 31 Januari 2017 pukul 21 UTC.

Terlihat lintasan satelit hanya mengenai bagian perairan dengan mengabaikan bagian daratan. Hal ini berhubungan dengan panjang gelombang yang telah dijabarkan bagian sebelumnya. Satelit altimetri merekam semua nilai tinggi gelombang laut signifikan yang dilintasi. Artinya koordinat yang ditampilkannya memiliki nilai yang tidak beraturan.

Shanas [20] mendapatkan tidak semua lintasan satelit altimetri bersesuaian dengan lokasi pengamatan *insitu* di perairan. Sehingga untuk menampilkan nilai tinggi gelombang signifikan yang bersesuaian seperti Gambar 2 dibutuhkan pengelompokan koordinat hasil pengukuran satelit altimetri ke dalam bentuk koordinat baru yang telah disesuaikan. Hasilnya terlihat pada Gambar 3.

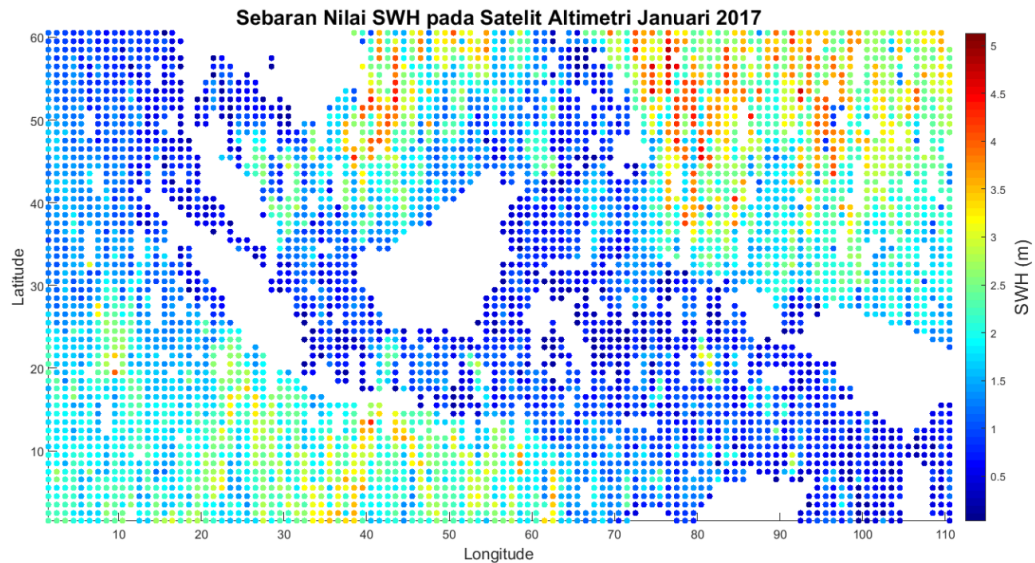
Perlu diperhatikan, koordinat yang ditampilkan pada Gambar 3 merupakan koordinat pengganti yang nilainya setara dengan koordinat pada Gambar 2. Selanjutnya yang menjadi tujuan utama dari konversi koordinat ini adalah menampilkan nilai tinggi gelombang laut signifikan dalam bentuk grid. Terlihat pada Gambar 3 perairan dalam Indonesia sepanjang bulan Januari 2017 nilainya relatif rendah ($< 1\text{m}$) dibandingkan dengan perairan luarnya yang cenderung tinggi. Rendahnya tinggi gelombang laut signifikan pada perairan dalam Indonesia bulan Januari 2017 umumnya sesuai dengan hasil prakiraan yang sudah dirilis oleh Pusat Meteorologi Maritim BMKG.



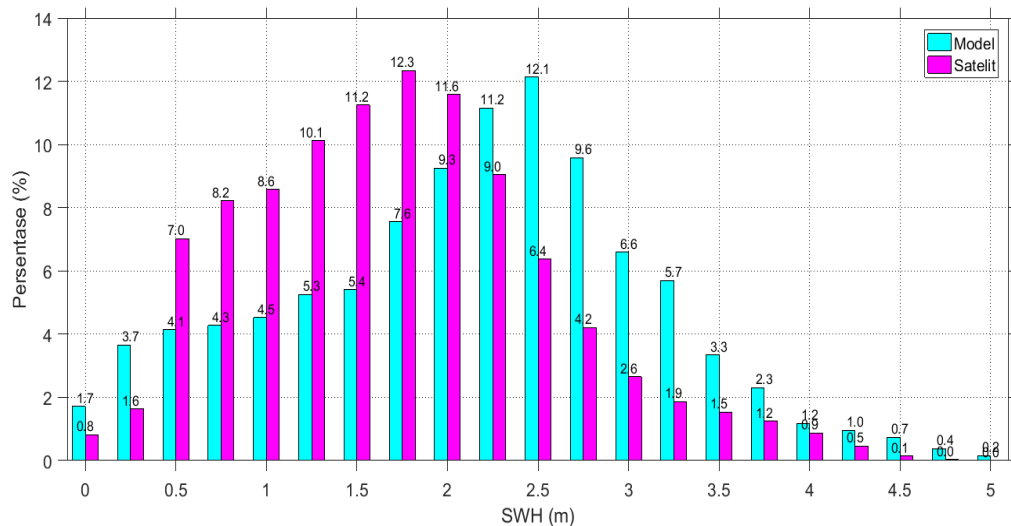
Gambar 2. Hasil perhitungan lintasan satelit altimetri di kepulauan Indonesia. Terlihat lintasan satelit berupa berupa garis diagonal dengan mengabaikan pengukuran di atas daratan. Parameter yang diamati adalah tinggi gelombang laut signifikan.

Selanjutnya tinggi gelombang laut signifikan dibagi dalam kategori lemah, cukup kuat dan kuat menurut definisi dari Pusat Meteorologi Maritim, masing-masing bernilai 0,5 – 1,25; 1,25 – 2,50; dan 2,50 – 4,00. Hasilnya disajikan dalam persentase kejadian diagram batang (Gambar 4). Terlihat persentase tinggi gelombang laut signifikan pengamatan satelit lebih tinggi bila dibandingkan hasil model untuk kategori cukup kuat ($\leq 2\text{ m}$). Namun untuk kategori kuat ($> 2\text{ m}$) persentase tinggi gelombang laut signifikan hasil pengamatan satelit lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil model.

Bila satelit altimetri mewakili pengukuran sebenarnya di lapangan maka dapat dikatakan, untuk kategori tinggi gelombang laut signifikan lemah sistem OFS lebih rendah dari pengamatan di lapangan. Sedangkan untuk kategori tinggi gelombang laut signifikan kuat hasil OFS lebih tinggi dari pengamatan di lapangan. Untuk itu perlu dilakukan penyesuaian (*tunning*) terhadap hasil model WW3 pada sistem OFS. Patut dicatat baik pada Gambar 3 maupun 4 menyajikan tinggi gelombang laut signifikan pada 8 waktu utama (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, dan 21 UTC) Januari 2017.



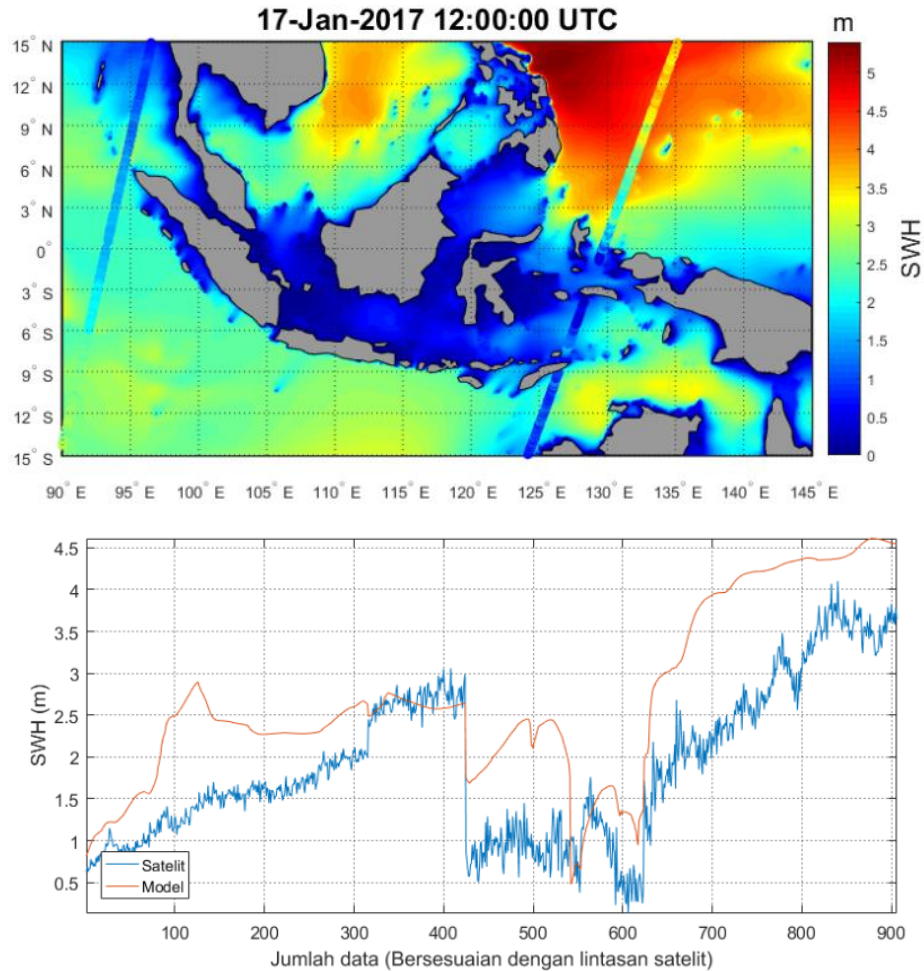
Gambar 3. Konversi koordinat konvensional pada Gambar 2 ke dalam koordinat bentuk grid. Daerah berwarna putih menyatakan daratan atau tidak terdapat pengukuran di wilayah tersebut.



Gambar 4. Persentase kejadian gelombang selama bulan Januari 2017 dengan membandingkan hasil dari sistem OFS maupun satelit. Hasil disajikan dalam bentuk persentase histogram.

Gambar 5a menyajikan tumpang tindih tinggi gelombang laut signifikan lintasan satelit altimetri (dalam hal ini Jason-2) dengan sistem OFS. Dalam melakukan proses tumpang tindih, baik hasil model maupun data satelit sebelumnya disamakan terlebih dahulu resolusi matriknya. Dalam hal ini resolusi model yang berukuran 881x481 diubah menjadi 3001x5501. Pengubahan resolusi ini tentunya tidak berpengaruh kepada kontur yang dihasilkan sebab interpolasi yang digunakan adalah interpolasi linier yang artinya perubahan resolusi di salah satu titik selalu disesuaikan dengan titik-titik disekitarnya secara linier berlanjut terus hingga titik terakhir. Terlihat perairan dalam Indonesia umumnya tenang dengan ketinggian gelombang rata-rata di bawah 1 meter kondisi ini berbeda dengan di luar perairan Indonesia, dimana gelombangnya lebih tinggi.

Sedangkan pada Gambar 5b menyajikan plot *time series* hasil model dengan pengamatan satelit. Terlihat hasil model lebih tinggi dari pengamatan satelit. Tingginya hasil model WW3 ini menjadi catatan tersendiri sebab belum bisa dipastikan faktor yang mempengaruhinya. Bila diperhatikan secara seksama plot dari pengamatan satelit mengalami fluktuasi tinggi sebab pengamatan dilakukan setiap waktu dan ada beberapa kasus dimana pada suatu waktu nilainya cenderung berfluktuatif secara ekstrim. Hal ini disebabkan pergantian pengukuran jalur lintasan satelit. Seperti yang disajikan pada Gambar 5a, terdapat 2 lintasan satelit, namun pada sumbu x di nilai 420 (Gambar 5b) fluktuatif nilai 2 lintasan terlihat dengan jelas. Gambar 5a dan 5b hanya salah satu contoh dari 248 lintasan satelit yang dibuat dalam kajian ini.



Gambar 5. (a) Tumpang tindih lintasan satelit (ditandai dengan garis lurus berwarna) di atas keluaran sistem OFS. (b) Plot *time series* perbandingan hasil model dan satelit.

Selanjutnya untuk menunjukkan hubungan antara hasil pemodelan dengan pengamatan satelit altimetri dibuat dalam *scatter* diagram (Gambar 6). Terlihat seluruh sebaran datanya mengarah ke kanan atas. Ini menunjukkan ada hubungan positif diantara kedua hasil tersebut. Ditambahkan juga kerapatan data dari masing-masing waktu pengamatan dalam bentuk kontur warna. Kerapatan tinggi terlihat pada perbandingan 2:2 untuk hasil model dan satelit. Ini menunjukkan bahwa banyak kemiripan dari hasil perbandingan pada kisaran nilai tersebut.

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa ketika diterapkan teknik *filtering* terhadap data yang digunakan, nilai koefisien relasi (r) yang dihasilkan tidak terlalu berbeda jauh hanya berbeda 1/100 dari nilai r awal, yaitu berkisar 0,54 – 0,68. Selain itu dengan menerapkan metode yang dilakukan oleh Myslenkov [21] dengan mengabaikan beberapa data dari Gambar 4 yang dilihat dari nilai RMSE, tidak juga menunjukkan perbedaan nilai korelasi yang signifikan pula. Ini memberi arti bahwa data satelit altimetri yang berasal dari GlobWave cocok

dimanfaatkan sebagai data pengamatan real tinggi gelombang laut signifikan.

Untuk mengetahui sebaran dan komposisi data pada pengamatan 8 waktu utama (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, dan 21 UTC), data hasil olahan selanjutnya ditampilkan dalam bentuk *boxplot* (Gambar 7). Terlihat pada *boxplot* nilai rata-rata tinggi gelombang laut signifikan sistem OFS lebih tinggi dari pengukuran satelit diseluruh waktu pengamatan. Termasuk untuk pengamatan keseluruhan pada bulan Januari 2017.

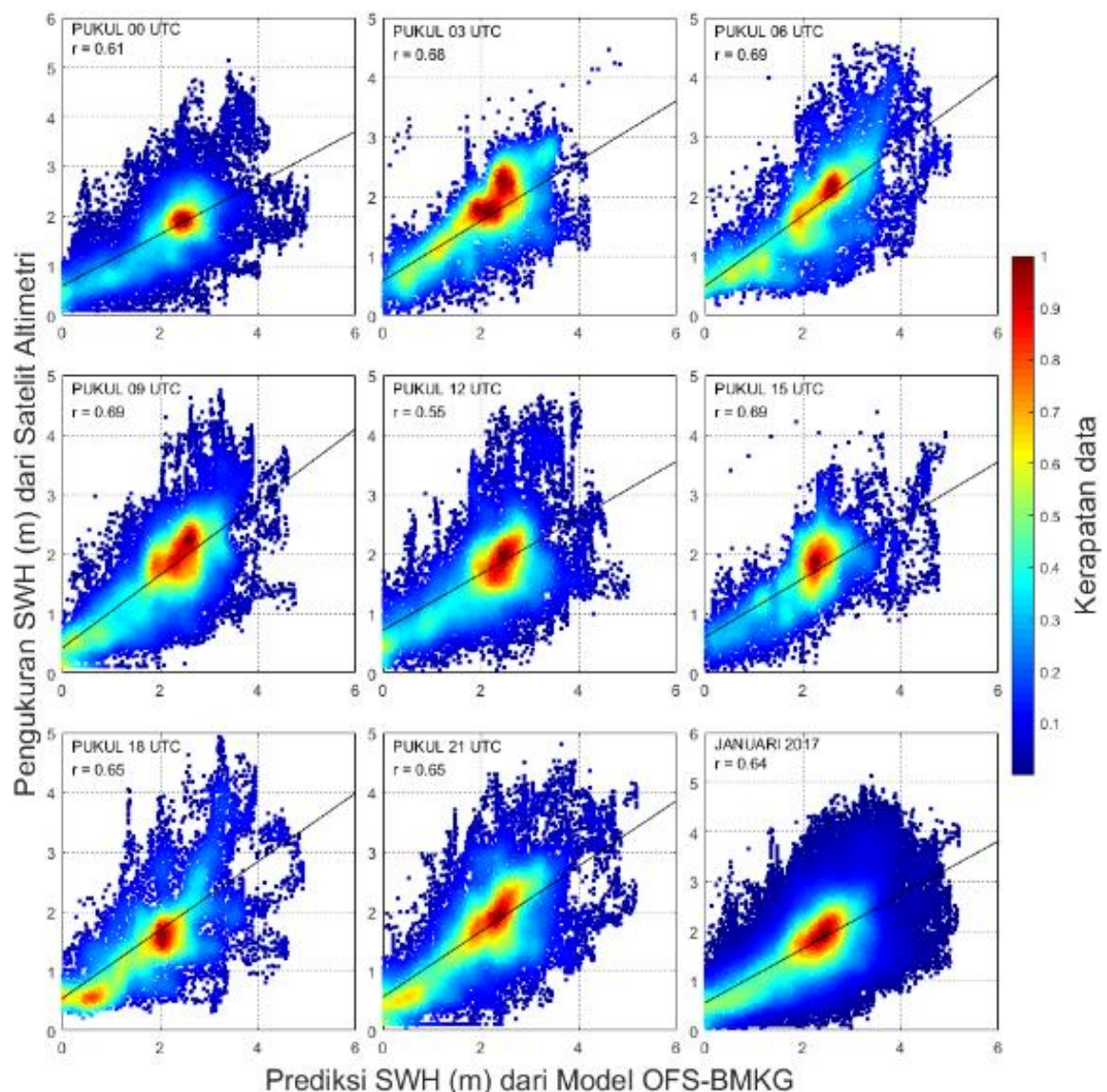
Baik data satelit maupun keluaran OFS keduanya mempunyai *outlier*. Ini menandakan data hasil kedua sumber ada yang lebih tinggi dari $Q3+1.5IQR$. Namun demikian pada penelitian ini data *outlier* tetap dimasukkan sebagai perhitungan sebab kita ingin melihat seluruh data sebagai satu buah populasi.

Diagram *scatter* pada penjelasan di atas merupakan salah satu cara untuk melihat hubungan korelasi dari hasil model dan satelit. Lebih lanjut Tabel 1

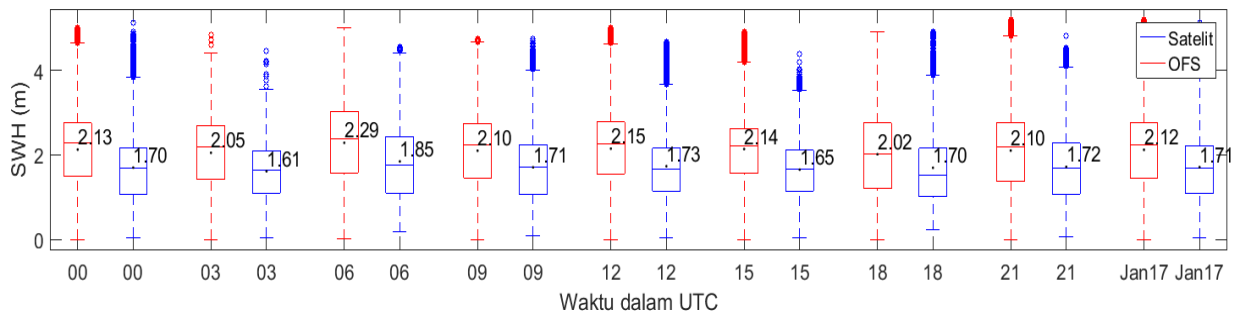
menunjukkan beberapa analisis statistik lainnya dari hasil kajian. Beberapa penelitian sering menggunakan nilai r untuk mencari keeratan dua buah hubungan. Korelasi tertinggi pada bulan Januari 2017 didapatkan pada pukul 06, 09, dan 15 UTC sebesar 0,69 sedangkan korelasi terendah pada pukul 12 UTC sebesar 0,55. Ini menandakan bahwa korelasi hasil model terhadap hasil pengamatan tergolong cukup. Sebab berdasarkan Hasan [22] nilai korelasi 0,4 – 0,7 masih memiliki hubungan keeratan yang cukup.

Bias terendah terjadi pada pukul 18 UTC. Namun demikian nilai bias yang dihasilkan selama bulan

Januari tidak lebih dari 0,5 m. Semakin kecil nilai bias yang dihasilkan semakin baik hasil keluaran model. RMSE terendah terjadi pada pukul 03 UTC sebesar 0,8030. Nilai RMSE menunjukkan jauh atau dekatnya sebaran hasil model terhadap pengamatan satelit. Semakin rendah nilainya semakin baik hasil model yang digunakan. Terakhir, nilai SI terbesar terjadi pada pukul 00 UTC sebesar 0,5427. Nilai SI menunjukkan hubungan kedekatan hasil model dengan pengamatan satelit dalam bentuk kemiringan garis (gradien). Bila nilai SI mendekati 1 artinya keluaran hasil model bisa dipercaya. Terlihat keempat nilai statistika terjadi pada waktu berbeda.



Gambar 6. Diagram *scatter* untuk 8 waktu pengamatan utama + 1 waktu di bulan Januari 2017. Kontur warna menunjukan kerapatan data perbandingan. Garis hitam tebal menunjukan tingkat hubungan perbandingan.



Gambar 7. *Boxplot* perbandingan data satelit dengan sistem OFS. Tanda titik pada kotak menunjukkan nilai mean, sedangkan tanda garis berwarna merah dan biru pada masing – masing kotak adalah median.

Tabel 1. Hasil analisa statistika hubungan SWH antara sistem OFS dengan pengamatan satelit (akurat hingga 4 angka di belakang koma).

Pukul	Analisis Statistika			
	Bias	R	RMSE	SI
00	0,4279	0,6115	0,9224	0,5427
03	0,4373	0,6807	0,8030	0,4977
06	0,4414	0,6878	0,9117	0,4938
09	0,3921	0,6942	0,8049	0,4713
12	0,4166	0,5534	0,9572	0,5522
15	0,4882	0,6862	0,8604	0,5208
18	0,3196	0,6519	0,8876	0,5232
21	0,3847	0,6482	0,8998	0,5234
Januari 2017	0,4099	0,6438	0,8865	0,5178

Dari hasil uji statistika diperoleh nilai koefisien korelasi (r) tinggi gelombang laut signifikan bulan Januari 2017 antara hasil model dengan pengamatan satelit sebesar 0,64. Beberapa uji lainnya seperti bias, RMSE, dan SI juga menunjukkan hubungan yang erat dengan masing-masing nilai 0,41; 0,89; dan 0,52. Sedangkan bila melihat sebaran dan komposisi data perbandingan diantara keduanya didapatkan keluaran hasil sistem OFS umumnya lebih tinggi dari pengamatan satelit altimetri pada semua lintasan.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini berhasil dilakukan sebuah metode untuk melakukan verifikasi tinggi gelombang laut signifikan terhadap model WW3 melalui sistem OFS di Pusat Meteorologi Maritim BMKG. Metode ini bekerja dengan membandingkan parameter fisik yang akan diamati dari lintasan satelit dengan nilai kontur tepat dibawah lintasan satelit itu berada.

Bila dilihat secara keseluruhan waktu pengamatan utama (00 – 21 UTC) didapatkan persentase keluaran hasil sistem OFS untuk tinggi gelombang signifikan kategori cukup kuat (≤ 2 m) lebih rendah dari pengamatan satelit. Sedangkan untuk tinggi gelombang signifikan kategori tinggi (> 2 m), persentase hasil sistem OFS kejadiannya lebih tinggi dari pengamatan satelit.

Saran

Ada tiga saran yang dapat dikembangkan dari hasil penelitian ini di masa mendatang. Pertama, penelitian ini masih dapat dilanjutkan dengan memperhitungkan parameter fisis oseanografi lainnya mengingat kesesuaian yang cukup teratur antara hasil model dengan satelit yang dihasilkan dalam kajian ini. Parameter fisis oseanografi ini mencakup batimetri, *water level*, dan anomali tinggi muka air. Kedua, perlu diketahui satelit altimetri mempunyai kelemahan pada laut dangkal yaitu tingginya gangguan (*noise*) yang dihasilkan. Akibatnya diperlukan pembagian wilayah berdasarkan rentang batimetri untuk mendapatkan kesesuaian yang tinggi antara hasil model dengan satelit altimeri. Ketiga, pada penelitian selanjutnya dapat dikembangkan koefisien atau faktor pengali agar hasil sistem OFS mendekati dengan observasi.

Bila tiga hal di atas sudah dilakukan dengan baik maka tidak menutup kemungkinan teknik ini dapat digunakan sebagai alat untuk melakukan verifikasi cuaca maritim di Pusat Meteorologi Maritim maupun UPT daerah.

Daftar Pustaka

- [1] CIA. "The World Factbook". Internet: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2060.html>, diakses 30 Juni 2018.

- [2] UNCTAD. "Review of Maritime Transport. 2012". Internet: unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2012_en.pdf, diakses 8 April 2018.
- [3] P. M. Vitousek, H.A. Mooney, J. Lubchenco, & J. M. Melillo, "Human Domination of Earth & Ecosystems," *Science*, 277(5325), 494 LP-499, 1997.
- [4] WMO 702. "Guide to Wave Analysis and Forecasting", 2nd edition, 1998.
- [5] V. Mesev, Integrations of GIS and Remote Sensing. UK: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1 – 13, 2007.
- [6] R. Adikari, & R. K. Agrawal, "An Introductory Study on Time Series Modeling and Forecasting." Internet: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1302/1302.6613.pdf>, diakses 8 Maret 2019.
- [7] F. Ienna, Y.-H. Jo, & X.-H. Yan, "A New Method for Tracking Meddies by Satellite Altimetry," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 31(6), 1434–1445, 2013.
- [8] P. Cipollini, F.M. Calafat, S. Jevrejeva, A. Melet, & P. Prandi, "Monitoring Sea level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges," *Surveys in Geophysics*, vol. 38, pp 33-57, 2017.
- [9] BRAT. "Broadview Radar Altimetry Toolbox: RADAR Altimetry Tutorial, issue 3a, 2018.
- [10] X. Ye, M. Lin, & Y. Xu, "Validation of Chinese HY-2 Satellite Radar Altimeter Significant Wave Height," *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 34, 2015.
- [11] M. Jiang, K. Xu, & Y. Liu, "Calibration and Validation of Reprocessed HY-2A Altimeter Wave Height Measurements Using Data from Buoys, Jason-2, Cryosat-2 and SARAL/AltiKa," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018.
- [12] K. H. B. Shaeb, A. Anand, A. K. Joshi, & S. M. Bhandari, "Comparison of Near Coastal Significant Wave Height Measurements from SARAL/AltiKa with Wave Rider Buoys in the Indian Region," *Marine Geodesy*, vol. 38(sup1), pp. 422–436, 2015.
- [13] H. Sepúlveda, P. Queffelec, & F. Ardhuin, "Assessment of SARAL AltiKa Wave Height Measurements Relative to Buoy, Jason-2 and Cryosat-2 Data," *Marine Geodesy*, vol. 38, 2015.
- [14] C. M. Appendini, & V. Camacho, "Using GlobWave L2P Data for Wave Hindcast Assessments in the Gulf of Mexico," 2012. <http://globwave.ifremer.fr/tools/case-studies-tutorials/using-globwave-l2p-data-for-wave-hindcast-assessments-in-the-gulf-of-mexico>
- [15] C. M. Appendini, Camacho-Magaña, V., & Breña-Naranjo, J. "ALTWAVE: Toolbox for Use of Satellite L2P Altimeter Data for Wave Model Validation," *Advances in Space Research*, vol. 57, 2015.
- [16] C. M. Appendini, A. Torres-Freyermuth, P. Salles, J. López-González, & E. T. Mendoza, "Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast," *Journal of Climate*, vol. 27(4), 1619–1632, 2013.
- [17] E. Y. Handoko, 2004, Satelit Altimetri dan aplikasinya dalam bidang kelautan, Pertemuan Ilmiah Tahunan I Teknik Geodesi – ITS Surabaya, pp. 137 – 144.
- [18] Y. Qin, Z. Chen, Y. Shen, S. Zhang, & R. Shi, "Evaluation of Satellite Rainfall Estimates over the Chinese Mainland," *Remote Sensing*, vol. 6(11), 2014.
- [19] Globwave. 2012. "Wave Data Handbook". Internet: http://globwave.ifremer.fr/download/GlobWave_D.9_WDH_v1.0.pdf, diakses 7 Maret 2019.
- [20] P. R. Shanass, V. S. Kumar, and N. K. Hithin, "Comparison of gridded multi-mission and along-track mono-mission satellite altimetry wave heights with in situ near-shore buoy data," *Ocean Engineering*, vol. 83, pp. 24 – 35, 2014.
- [21] S. A. Myslenkov, & A. Chernyshova, "Comparing Wave Heights Simulated in the Black Sea by the SWAN Model with Satellite Data and Direct Wave Measurements," *Russian Journal of Earth Sciences*, vol. 16, 2016.
- [22] M. I. Hasan, *Pokok-Pokok Materi Statistik 1 (Statistik Deskriptif)*. Jakarta: Bumi Aksara, pp. 227 – 261, 2001.