

**PENINGKATAN AKURASI ESTIMASI TINGGI PARAS LAUT MELALUI
ANALISIS *RETRACKING WAVEFORM* SATELIT JASON-2 DI LAUT JAWA**

***ACCURACY IMPROVEMENT ON SEA SURFACE HEIGHT ESTIMATION BASED ON
WAVEFORM RETRACKING ANALYSES OF JASON-2 SATELLITE IN JAVA SEA***

Muhammad R. Hakim^{1*}, Bisman Nababan², dan James P. Panjaitan²

¹Program Studi Teknologi Kelautan, Sekolah Pascasarjana, IPB, Bogor

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor

*E-mail: anugerah.hakim@gmail.com

ABSTRACT

A waveform created by the reflected signal from altimeter satellite in offshore is generally in ideal shape (Brown-waveform) and produces an accurate sea surface height (SSH) estimation. However, over coastal waters, the waveform shape becomes complex due to a disruption by reflected signal from land, resulting in inaccurate SSH estimation. The objective of this research was to improve the accuracy of SSH estimation employing waveform retracking analyses of Jason-2 altimeter satellite data in the Java Sea during the years of 2012-2014. This study used data from the Sensor Geophysical Data Record type D (SGDR-D) from Jason-2 satellite (cycle 129 - 239) and global geoid undulation data of Earth Gravitational Model 2008 (EGM08). Waveform retracking analyses were conducted using several retracker methods. The performance of the all retracker were examined using a world reference undulation geoid of EGM08. The results showed that the waveform retracking analyses were able to improve the accuracy of SSH estimation approximately 29.7% in the north coast and 56.4% in the south coast of total non-Brown-waveform in each region. Higher improvement percentage (IMP) of SSH estimation found in the southern coastal areas was due to a relatively smooth coastline formation in this region than in northern coastal region. There was no specific retracker that produce dominant IMP of SSH estimation. However, the threshold 10% retracker produced better SSH estimation than the other retracker with dominant IMP values of 57.1% (pass 051), 48.1% (pass 064), and 25.7% (pass 127). OCOG retracker the worst retracker to estimate SSH in the Java Sea.

Keywords: EGM08, waveform retracking, SSH, Jason-2, ocean retracker, threshold retracker

ABSTRAK

*Waveform yang terbentuk dari pantulan sinyal satelit altimeter umumnya berbentuk ideal (Brown-waveform) di laut lepas dan menghasilkan estimasi SSH yang akurat. Akan tetapi, pada perairan pesisir dimana adanya gangguan pantulan sinyal dari daratan akan menghasilkan waveform yang kompleks dan estimasi SSH menjadi kurang akurat. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi estimasi SSH melalui analisis *retracking waveform* data satelit altimeter Jason-2 tahun 2012-2014 di Laut Jawa. Penelitian ini menggunakan data *Sensor Geophysical Data Record type D* (SGDR-D) dari satelit Jason-2 (cycle 129-239) dan data undulasi geoid global *Earth Gravitational Model 2008* (EGM08). Analisis *retracking waveform* dilakukan dengan menggunakan beberapa metode *retracker* yang performanya diuji dengan menggunakan referensi undulasi geoid EGM08. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis *retracking waveform* berhasil meningkatkan akurasi estimasi SSH sekitar 29,7% di pesisir utara dan 56,4% di pesisir selatan dari jumlah *non-Brown-waveform* pada masing-masing daerah. Peningkatan perbaikan estimasi SSH lebih baik di daerah pesisir selatan disebabkan garis pantai di daerah ini relatif lebih lurus dibandingkan di daerah pesisir utara yang lebih bergelombang. Tidak ada satu metode *retracker* yang dominan untuk peningkatan akurasi estimasi SSH. Namun, *retracker threshold 10%* menghasilkan estimasi SSH yang lebih baik dibandingkan *retracker* lainnya dengan nilai IMP dominan pada tiga lintasan sebesar 57,1% (051), 48,1% (064), dan 25,7% (127). *OCOG retracker* merupakan *retracker* terburuk untuk estimasi SSH di Laut Jawa.*

Kata kunci: EGM08, retracking waveform, SSH, Jason-2, ocean retracker, threshold retracker

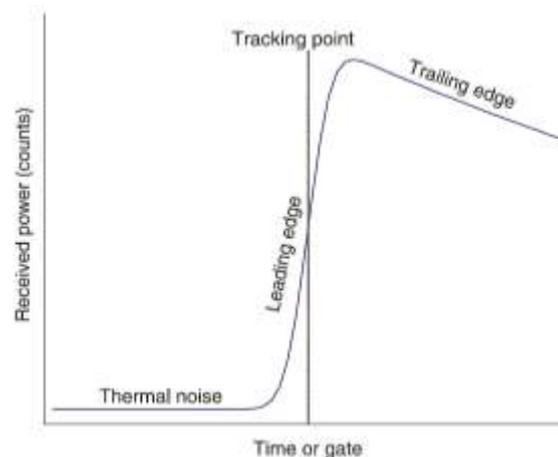
I. PENDAHULUAN

Pemanasan global yang terjadi dewasa ini sangat berpengaruh terhadap kenaikan paras laut. Williams (2013) menyatakan bahwa kenaikan rata-rata paras laut global saat ini mencapai 3,1 mm/tahun, meningkat 50% selama dua dekade terakhir. Sedangkan, rata-rata kenaikan paras laut di seluruh perairan Indonesia hampir dua kali lebih tinggi dari laju rata-rata kenaikan paras laut global yaitu mencapai 5,84 mm/tahun (Nababan *et al.*, 2015). Bilamana laju kenaikan paras laut ini terus berlanjut, maka daerah-daerah pesisir dan pulau-pulau kecil di Kepulauan Indonesia dapat terancam tergenang.

Laut Jawa merupakan salah satu perairan di Indonesia yang memiliki beberapa gugusan kepulauan pulau-pulau kecil seperti Kepulauan Seribu, Kepulauan Karimun Jawa, Kepulauan Masalembu, dan Kepulauan Kangean. Gugusan kepulauan tersebut tidak hanya berpenduduk, tetapi juga merupakan tujuan wisata yang penting bagi Indonesia. Oleh karena itu, pengamatan dan monitoring SSH yang berkelanjutan di Laut Jawa sangat penting dilakukan sehingga laju kenaikan paras laut dapat terus dimonitor. Pemantauan kenaikan SSH dapat dilakukan dengan menggunakan data satelit altimeter. Keuntungan utama menggunakan data satelit altimeter adalah deteksi SSH dapat dilakukan pada saat siang/malam hari pada semua kondisi cuaca tanpa adanya kehilangan data akibat penutupan awan serta memiliki cakupan deteksi yang besar (Birkett *et al.*, 2011; Benveniste, 2011; Chelton *et al.*, 2001).

Deng and Featherstone (2006) menyatakan bahwa di laut lepas *waveform* yang terbentuk dari pantulan sinyal satelit altimeter umumnya memiliki bentuk ideal yang mengikuti model *ocean* yang pertama dihasilkan oleh Brown (1977) sehingga disebut juga *Ocean-waveform* atau *Brown-waveform* (Gambar 1). Namun, pada perairan dangkal dengan kedalaman <200 m yang

dekat dengan wilayah pesisir (seperti Laut Jawa) umumnya memiliki bentuk *waveform* yang kompleks akibat kontaminasi pantulan sinyal dari daratan (Nababan *et al.*, 2015; Bao *et al.*, 2008; Andersen and Knudsen, 2000). Gommenginger *et al.* (2011) melaporkan bahwa rata-rata sekitar 94% dari keseluruhan *waveform* Satelit Jason-2 yang dianalisis di seluruh pantai Australia memiliki bentuk *Brown-waveform* hingga jarak 15 km dari garis pantai dimana persentase ini akan menurun secara signifikan semakin menuju pantai. Sedangkan, Nababan *et al.* (2014) melaporkan di wilayah perairan selatan Jawa pola *Brown-waveform* umumnya sudah dapat ditemui mulai pada jarak 7,58 km dari garis pantai.



Gambar 1. Skema bentuk *Brown-waveform* pada laut lepas (Deng and Featherstone, 2006).

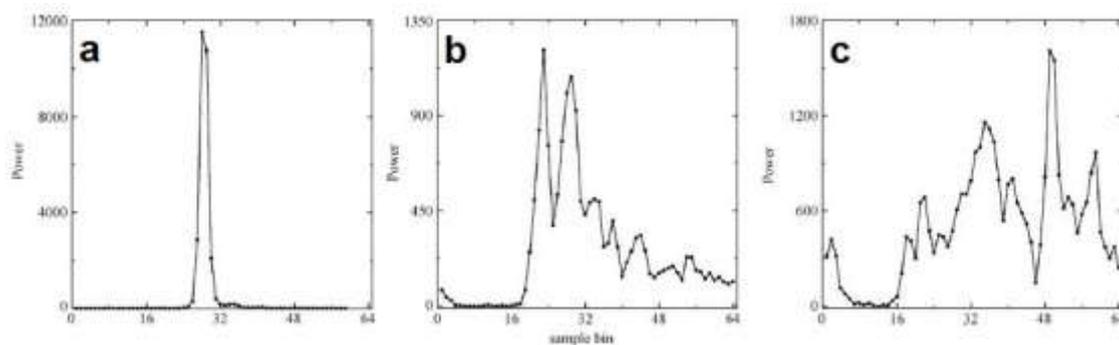
Waveform adalah bentuk dari kekuatan resultan pantulan gelombang mikro yang terekam oleh satelit pada saat pulsa gelombang mikro yang dipancarkan tersebut mengenai permukaan bumi (Quartly *et al.*, 2001). *Waveform* umumnya memiliki tiga bagian utama, yaitu: *thermal noise*, *leading edge*, dan *trailing edge*. Bagian *thermal noise* merupakan waktu pada saat sinyal satelit altimeter belum menyentuh permukaan laut sehingga belum terjadi peningkatan *power* akibat pantulan sinyal. Bagian *leading edge* merupakan waktu ketika sinyal satelit

pertama kali menyentuh permukaan laut (titik nadir), sedangkan bagian *trailing edge* merupakan pantulan dari sinyal satelit di sekeliling titik nadir (Gommenginger *et al.*, 2011; Deng and Featherstone, 2006). Pada bentuk *Brown-waveform*, secara umum, lokasi *leading edge* umumnya tepat berada pada nomor *gate* 32 (Satelit Jason-2) sehingga estimasi SSH dapat ditentukan dengan tingkat akurasi yang tinggi sampai pada 2,5 cm (Rosmorduc *et al.*, 2011; Dumont *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2010). Sedangkan pada *waveform* yang berbentuk *non-Brown* atau kompleks (Gambar 2), tingkat akurasi estimasi SSH menjadi rendah karena umumnya titik tengah *leading edge* tidak tepat berada pada nomor *gate* 32 dan umumnya polanya tidak beraturan. Pola *non-Brown-waveform* ini umumnya banyak ditemukan di perairan laut dangkal dekat wilayah pesisir (Nababan *et al.*, 2014). Hal ini menyebabkan nilai pendugaan SSH oleh satelit altimeter khususnya pada daerah laut dangkal dekat wilayah pesisir menjadi tidak akurat dengan menggunakan algoritma standar (*Ocean Retracker*).

Untuk meningkatkan estimasi SSH khususnya di perairan laut dangkal dekat wilayah pesisir, maka perlu dilakukan pemrosesan ulang data satelit altimeter melalui proses *retracking waveform* (Lee *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010; Deng and Featherstone, 2006; Hwang *et al.*, 2006).

Retracking waveform didefinisikan sebagai suatu proses perhitungan ulang nilai SSH dengan algoritma lain dari algoritma standar (*Ocean Retracker*) untuk menentukan koreksi akibat adanya bias dari *gate* (gerbang) pengamatan. SSH hasil dari analisis *retracking waveform* (SSH *retracking*) yang didefinisikan sebagai SSH yang selain mendapat koreksi instrumen dan geofisika standar, juga mendapatkan koreksi dari bias *gate* pengamatan (Bao *et al.*, 2008).

Penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa penggunaan analisis *retracking waveform* telah mampu meningkatkan akurasi pendugaan SSH khususnya di perairan pesisir dan laut dangkal (Nababan *et al.*, 2014; Adrian, 2013; Yang *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2006). Estimasi SSH untuk perairan Indonesia yang banyak memiliki perairan dangkal dan wilayah pesisir memiliki tingkat akurasi yang cukup rendah. Sementara penelitian *retracking waveform* pada perairan Indonesia khususnya pada perairan dangkal dan pesisir masih sangat minim. Penelitian *retracking waveform* di Laut Jawa dilakukan oleh Wijaya (2015) terbatas pada wilayah pesisir utara Jawa dari garis pantai hingga jarak 50 km ke arah laut lepas. Untuk itu, dalam penelitian ini kami memperluas wilayah cakupan data satelit (seluruh Laut Jawa) dan waktu pengambilan data satelit (2012-2014).



Gambar 2. Contoh pantulan *waveform*. (a) *Ice waveform* yang umum ditemui di daerah kutub; (b) *Multi-peak waveform* yang umum ditemui di dekat garis pantai; dan (c) *Complex waveform* yang umum ditemui di daerah pesisir dan laut dangkal (Bao *et al.*, 2008).

Satelit altimeter Jason-2 merupakan satelit altimeter penerus dari Satelit TOPEX/POSEIDON dan Jason-1 dengan tujuan utama adalah untuk melengkapi rekaman iklim global puluhan tahun dari hasil pengukuran topografi permukaan laut dengan ketelitian tinggi (Nababan *et al.*, 2014; Lambin *et al.*, 2010). Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi estimasi SSH melalui analisis *retracking waveform* data satelit altimeter Jason-2 tahun 2012-2014 dengan menggunakan algoritma (*retracker*) *Offset Centre of Gravity* (OCOG), *Ice Threshold*, dan *Improved Threshold* di Laut Jawa. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi estimasi SSH di Laut Jawa sehingga monitoring kenaikan paras laut dapat dilakukan dengan baik.

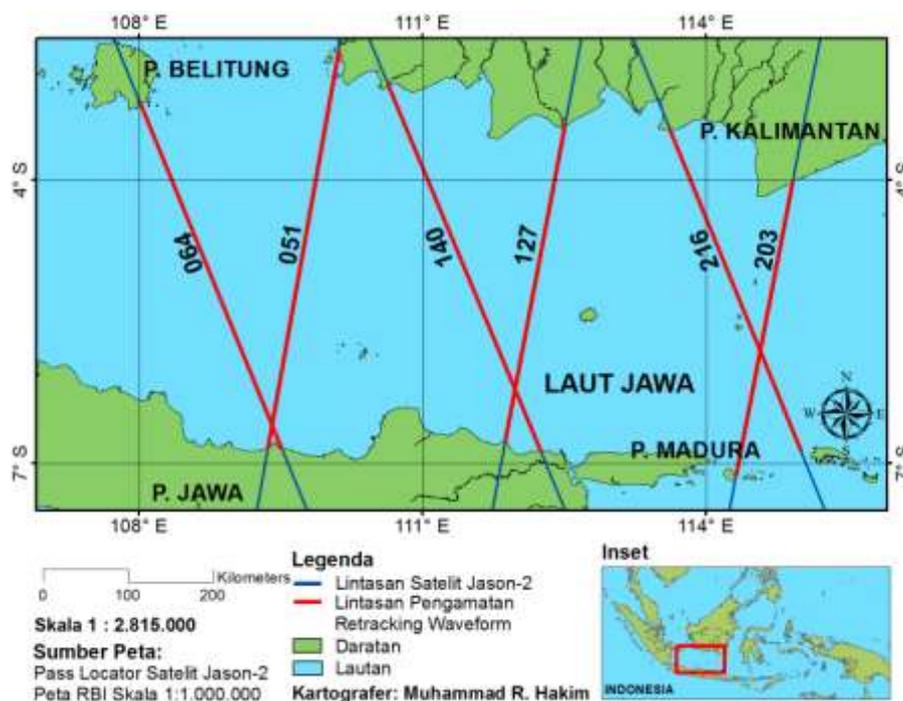
II. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian adalah Laut Jawa pada koordinat $2,5^{\circ}$ - $7,5^{\circ}$ LS dan 107° - 116° BT dengan lintasan 064, 051, 140, 127, 216, 203,

dan 203 dari satelit altimeter Jason-2 (Gambar 3). Lintasan atau *pass* adalah jalur orbit satelit dimana satu lintasan satelit altimeter Jason-2 merupakan setengah revolusi dari satelit tersebut terhadap bumi. Satelit altimeter Jason-2 memiliki total 254 lintasan untuk mengamati seluruh permukaan bumi sehingga satelit tersebut mengelilingi bumi sebanyak 127 kali (berevolusi). Satu kali revolusi (siklus) terbagi ke dalam satu lintasan *ascending* (menaik) dan satu lintasan *descending* (menurun).

Lintasan *ascending* merupakan lintasan satelit yang bergerak dari bumi bagian selatan menuju bumi bagian utara (lintang $-66,15^{\circ}$ hingga $+66,15^{\circ}$) dan diberi penomoran ganjil, sedangkan lintasan *descending* adalah sebaliknya. Siklus atau *cycle* adalah waktu yang dibutuhkan oleh satelit untuk melintasi lintasan yang sama. Satu *cycle* satelit altimeter Jason-2 membutuhkan waktu 9,9156 hari (~ 10 hari) dengan ketelitian orbit ± 1 km (Dumont *et al.*, 2011). Dalam penelitian ini, analisis *retracking waveform* dilakukan pada enam lintasan satelit Jason-2



Gambar 3. Peta lokasi penelitian. Angka pada garis merah menunjukkan nomor lintasan (*pass*) satelit altimeter Jason-2.

yang melintasi Laut Jawa dimana pada ujung utara dan selatan dari setiap lintasan pengamatan tersebut merupakan daerah pesisir, selanjutnya akan disebut sebagai pesisir utara dan pesisir selatan dari lintasan tersebut (Gambar 3). Enam lintasan Jason-2 yang digunakan, yaitu: 051, 127, dan 203 (*ascending*) serta 064, 140, dan 216 (*descending*). Untuk mempermudah analisis, pengukuran titik 0 km dilakukan dari arah pesisir utara menuju selatan. Koordinat titik awal dan titik akhir pengamatan *retracking waveform* pada setiap lintasan (*pass*) selengkapnya disajikan pada Tabel 1.

2.2. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari satelit altimeter Jason-2 dalam bentuk *Sensor Geophysical Data Record* versi “D” (SGDR-D) dari *cycle* 129 – 239 (Januari 2012 – Desember 2014). Data diperoleh dari situs ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub/jason-2/sgdr_d/. Penelitian ini juga menggunakan data model undulasi geoid global yaitu *Earth Gravitational Model 2008* (EGM08) yang mengacu kepada *World Geodetic System 1984* (WGS84). Data EGM08 diperoleh dari hasil pemodelan menggunakan pemrograman FORTRAN (*hsynth_WGS84.exe*) yang berjalan di sistem operasi *Windows*. Program tersebut dikembangkan oleh *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) dan dapat diperoleh dari http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html.

2.3. Analisis Data

Satelit altimeter Jason-2 melakukan pengukuran ketinggian terhadap permukaan laut (*range*) dengan cara memancarkan gelombang mikro ke permukaan laut kemudian mengukur selisih waktu saat pemancaran dan penerimaan pantulan gelombang tersebut. Berikut perhitungan SSH menurut Chelton et al. (2001) yang ditunjukkan pada persamaan 1 berikut:

$$SSH = Altitude - Range \dots\dots\dots (1)$$

dimana: SSH=tinggi permukaan laut (m), *Altitude*=ketinggian satelit dari referensi elipsoid (m), *Range*=ketinggian satelit dari permukaan laut (m). Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai *Range* ditunjukkan pada persamaan 2 berikut (Anzenhofer et al., 1999):

$$Range = c (t_r - t_e) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

dimana: *Range*=ketinggian satelit dari permukaan laut (m), *c*=kecepatan cahaya (299792458 m/s), *t_e*=waktu saat satelit memancarkan gelombang mikro ke permukaan laut (s), *t_r*=waktu saat satelit menerima gelombang pantul dari permukaan laut (s).

Titik tengah pada *leading edge waveform* berhubungan dengan *range* pada titik nadir permukaan laut (Lee et al., 2010; Guo et al., 2010; Deng and Featherstone, 2006; Hwang et al., 2006). Pada laut lepas dimana umumnya *waveform* berbentuk

Tabel 1. Koordinat lintasan pengamatan *retracking waveform*.

| Lintasan (<i>Pass</i>) | Koordinat awal | | Koordinat akhir | |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Lintang | Bujur | Lintang | Bujur |
| 051 | 2°53'31,72"LS | 110°13'31,03"BT | 6°43'52,80"LS | 108°50'34,66"BT |
| 064 | 3°10'29,96"LS | 108°08'25,52"BT | 6°49'43,54"LS | 109°27'25,35"BT |
| 127 | 3°15'05,35"LS | 112°55'52,57"BT | 6°43'39,55"LS | 111°40'45,53"BT |
| 140 | 3°03'06,48"LS | 110°55'53,31"BT | 6°52'12,34"LS | 112°18'25,48"BT |
| 203 | 3°46'40,01"LS | 115°34'39,33"BT | 6°57'08,38"LS | 114°25'55,50"BT |
| 216 | 3°24'33,13"LS | 113°53'39,27"BT | 6°55'47,70"LS | 115°09'49,47"BT |

Brown-waveform titik tengah dari *leading edge* berada pada *gate* ke-32 sehingga titik tengah *leading edge on-board* pada Satelit Jason-2 ditetapkan pada *gate* ke-32 (Lee *et al.*, 2010). Namun, pada perairan pesisir atau laut dangkal dikarenakan bentuk *waveform*-nya yang tidak mengikuti model *Brown-waveform* maka menyebabkan posisi titik tengah *leading edge* berubah-ubah tergantung kondisi fisik permukaan laut sehingga tidak sesuai dengan nilai posisi *leading edge* yang telah ditetapkan pada satelit. Hal ini menyebabkan perhitungan *range* menghasilkan nilai yang kurang akurat (Lee *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010; Deng and Featherstone, 2006; Hwang *et al.*, 2006;). *Gate* atau gerbang merupakan waktu pengamatan saat terjadinya pantulan gelombang. Satelit Jason-2 memiliki 104 *gate* dimana jarak antar *gate* sebesar 3,125 ns (nano second) sehingga rentang waktu yang diperlukan untuk merekam satu data *waveform* adalah sebesar 325 ns (Gommenginger *et al.*, 2011).

2.3.1. Retracking Waveform

Retracking waveform merupakan suatu metode untuk mencari *tracking gate* yang tepat memotong titik tengah dari *leading edge* untuk mendapatkan nilai *range* yang sebenarnya (Deng and Featherstone, 2006). Terdapat beberapa metode *retracking waveform (retracker)* yang digunakan pada penelitian ini, diantaranya *retracker ocean, ice, OCOG, threshold (10%, 20%, dan 50%),* serta *improved threshold (10%, 20%, dan 50%)*. Metode *retracker ocean* merupakan *retracker on-board* yang sudah berada di dalam data SGDR-D Jason-2 sehingga nilai *range* dari *retracker* tersebut tidak perlu dihitung lagi (Lee *et al.*, 2010). *Retracker ocean* dikembangkan dengan menggunakan model *Brown-waveform* dimana penjelasan lebih lanjut dapat ditemukan pada Brown (1977). *Retracker ice* awalnya dikembangkan untuk mengamati ketinggian es di kutub dimana *retracker* ini dikembangkan dari *retracker threshold 30%* menggunakan rata-rata besaran *power* dari *waveform* yang

sebelumnya dihitung dengan metode OCOG, penjelasan metode *retracker ice* dapat ditemukan pada Bamber (1994). *Retracker OCOG* dikembangkan oleh Wingham *et al.* (1986) dimana tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan titik pusat dari *waveform*. Rumus dan penjelasan lebih detail mengenai *retracker OCOG* dapat ditemukan pada Wingham *et al.*, (1986). Rumus dan penjelasan dalam analisis perhitungan metode *retracker threshold (10%, 20%, dan 50%),* serta *improved threshold (10%, 20%, dan 50%)* secara lengkap disajikan masing-masing pada Davis (1995) dan Hwang *et al.* (2006).

Menurut Anzenhofer *et al.* (1999) dan Yang *et al.* (2012) hasil dari analisis *retracking waveform* merupakan nilai koreksi *range* yang dihitung dengan menselisihkan nilai *gate* dari posisi titik tengah *leading edge* hasil *retracking waveform* dengan posisi titik tengah *leading edge on-board* (persamaan 3). *Range* hasil *retracking* didapatkan dari penambahan *range on-board* Satelit Jason-2 dengan nilai koreksi *range* (persamaan 4).

$$dr = c \times \Delta Ga \times (Gr - G_0) / 2 \dots\dots (3)$$

$$R_r = R + dr \dots\dots\dots (4)$$

dimana: dr =koreksi ketinggian satelit dengan permukaan laut hasil *retracking* (m), c =kecepatan cahaya (299792458 m/s), ΔGa = interval waktu untuk satu *gate* Satelit Jason-2 (3,125 ns), G_r =*gate* pengamatan pada titik tengah *leading edge* dari hasil *retracking*, G_0 =*gate* pengamatan *on-board* Satelit Jason-2 (32), R =*range* hasil pengukuran satelit (m), R_r =*range* hasil *retracking* (m).

Perhitungan selanjutnya adalah menambahkan koreksi dari gangguan geofisik dan atmosferik terhadap *range* hasil *retracking* (R_r) untuk mendapatkan *range* terkoreksi (R_{corr}), seperti ditunjukkan pada persamaan 5 (Andersen and Scharroo, 2011).

$$R_{corr} = R_r - \Delta h_{dry} - \Delta h_{wet} - \Delta h_{iono} - \Delta h_{ssb} - h_{tides} - h_{atm} \dots\dots\dots (5)$$

dimana: R_{corr} =range terkoreksi (m), R_r =range hasil *retracking* (m), Δh_{dry} =koreksi troposfer kering (m), Δh_{wet} =koreksi troposfer basah (m), Δh_{iono} =koreksi ionosfer (m), Δh_{ssb} =koreksi bentuk permukaan laut (m), h_{tides} =koreksi pasang surut (m), h_{atm} =koreksi atmosferik dinamis (m).

Langkah terakhir untuk mendapatkan nilai SSH hasil *retracking waveform* atau SSH *retracking* adalah dengan menggunakan persamaan dari Yang et al. (2008) seperti pada persamaan 6. Satelit Jason-2 memiliki nilai *altitude* atau ketinggian satelit dari referensi elipsoid sebesar 1336 km di wilayah ekuator (Dumont et al., 2011).

$$SSH_{retracking} = Altitude - R_{corr} \dots \dots (6)$$

dimana: $SSH_{retracking}$ =tinggi permukaan laut hasil *retracking* (m), *Altitude*=ketinggian satelit dari referensi elipsoid (m), R_{corr} =range terkoreksi (m).

2.3.2. Perhitungan Perbaikan Kemampuan Retracker dan Validasi SSH Retracking

Kemampuan atau performa dari beberapa *retracker* dapat dihitung dengan menggunakan rumus *Improvement Percentage* (IMP) berdasarkan perhitungan Hwang et al. (2006) yang telah dikembangkan oleh Lee et al. (2010) sehingga kemampuan dari masing-masing *retracker* yang lain dapat diketahui dengan menjadikan *retracker ocean* (*retracker on-board*) sebagai acuan perbaikan kemampuan. Perbaikan kemampuan SSH *retracking* terhadap SSH *on-board* ditunjukkan pada persamaan 7.

$$IMP = (\sigma_{ocean} - \sigma_{retracking}) / \sigma_{ocean} \times 100\% (7)$$

dimana: IMP=persentase perbaikan kemampuan (%), σ_{ocean} =standar deviasi dari selisih SSH *on-board* dengan undulasi geoid (m), $\sigma_{retracker}$ =standar deviasi dari selisih SSH *retracking* dengan undulasi geoid (m).

Nilai persentase IMP dari setiap *retracker* menunjukkan seberapa besar

perbaikan kemampuan dari *retracker* tersebut terhadap *retracker on-board* sehingga semakin besar nilai IMP-nya akan semakin baik kemampuan dari *retracker* tersebut demikian pula sebaliknya. Validasi terhadap SSH *retracking* diuji dengan melihat profilnya terhadap profil undulasi geoid (EGM08). Apabila profil dari SSH *retracking* tidak menyerupai profil undulasi geoidnya (berfluktuasi) maka SSH *retracking* tersebut dianggap masih memiliki *noise* yang tinggi dan tidak valid untuk digunakan sekalipun telah mampu memperbaiki kesalahan dari SSH *on-board* (Lee et al., 2010; Guo et al., 2010; Fenoglio-Marc et al., 2010; Bao et al., 2008; Hwang et al., 2006).

2.3.3. Perhitungan Sea Level Anomaly (SLA)

Sea level anomaly (SLA) didefinisikan sebagai pengurangan antara SSH dengan paras laut rata-rata atau *mean sea surface* (MSS) dan koreksi geofisik Dumont et al. (2011) dengan rumus sebagai berikut:

$$SLA = SSH - MSS - koreksi\ geofisik \dots (8)$$

dimana: SLA=anomali paras laut (m), SSH=tinggi paras laut (m), MSS=tinggi paras laut rata-rata (m).

Perhitungan SLA penting untuk dilakukan karena SLA dapat memberikan informasi, diantaranya: kondisi topografi laut yang sebenarnya, respon dinamis terhadap tekanan atmosfer, kesalahan model pengukuran (ketidakberaturan, bias bentuk paras laut, error altimeter, dan koreksi atmosferik), dan perbedaan antara pasang surut (*pasut in situ*) dan model pasut (Dumont et al., 2011).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Bentuk Waveform

Berdasarkan analisis pola atau bentuk *waveform* untuk seluruh lintasan satelit altimeter Jason-2 di Laut Jawa selama 3 tahun (Januari 2012-Desember 2014), secara umum atau sekitar 97% dari *waveform* yang

ada berbentuk *Brown-waveform*. Namun, di daerah pesisir baik yang berada di ujung utara maupun selatan dari setiap lintasan satelit umumnya didominasi oleh bentuk *non-Brown-waveform*. Secara umum, rata-rata persentase *non-Brown-waveform* dari seluruh lintasan selama 3 tahun di Laut Jawa adalah 5,6% dimana persentase *non-Brown-waveform* tertinggi ditemui pada nomor lintasan (*pass number*) 203 dengan nilai sebesar 6,9% dari seluruh data *waveform* dalam satu lintasan tersebut, sedangkan yang memiliki persentase *non-Brown-waveform* terendah terdapat pada nomor lintasan 140 sebesar 4,9% (Tabel 2). Keberadaan *non-Brown-waveform* tersebut ditemukan pada setiap lintasan dan setiap *cycle* khususnya yang paling dekat dengan garis pantai. Namun, semakin jauh dari garis pantai, umumnya pola *waveform* menjadi lebih teratur dan semakin mendekati pola *Brown-waveform*. Pola yang sama juga ditemui pada perairan selatan pulau Jawa (Nababan *et al.*, 2014). Contoh bentuk *waveform* dari seluruh data *waveform* yang terbentuk pada lintasan 064 *cycle* 229 menunjukkan dominasi *non-Brown-waveform* pada daerah pesisir utara dan selatan dari lintasan tersebut (Gambar 4). Satelit Jason-2 dilengkapi dengan *gate* pengamatan yang telah ditetapkan oleh satelit tersebut (*pre-given gate*) yaitu pada *gate* ke-32. Hal ini disesuaikan dengan model *Brown-waveform* yang umumnya memiliki titik tengah *leading edge* pada *gate* ke-32. Bilamana titik tengah *leading edge* *Brown-*

waveform tepat berada pada *gate* ke-32, maka *ocean retracker* akan menghasilkan estimasi SSH yang sangat akurat. Apabila titik tengah *leading edge* sebuah *waveform* tidak tepat berada pada *gate* ke-32, maka hasil estimasi SSH oleh *ocean retracker* menjadi kurang akurat (Gambar 5a). Algoritma *ocean retracker* secara otomatis dapat mengidentifikasi *non-Brown-waveform* bilamana *pre-given gate* (*gate* ke-32) berada di sebelah kiri dan tidak bersentuhan dengan *leading edge* sebuah *waveform* dengan memberi signal “*alt echo type*” secara aktif (*on*) serta memberi nilai estimasi SSH sebagai *NaN* (Gambar 5b) (Gommenginger *et al.*, 2011; Dumont *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2010). Nilai SSH hasil estimasi *ocean retracker* berupa nilai *NaN* atau nilai SSH yang kurang akurat (*error*) inilah yang akan dianalisa kembali oleh *retracker* lain untuk mendapatkan nilai SSH yang lebih akurat.

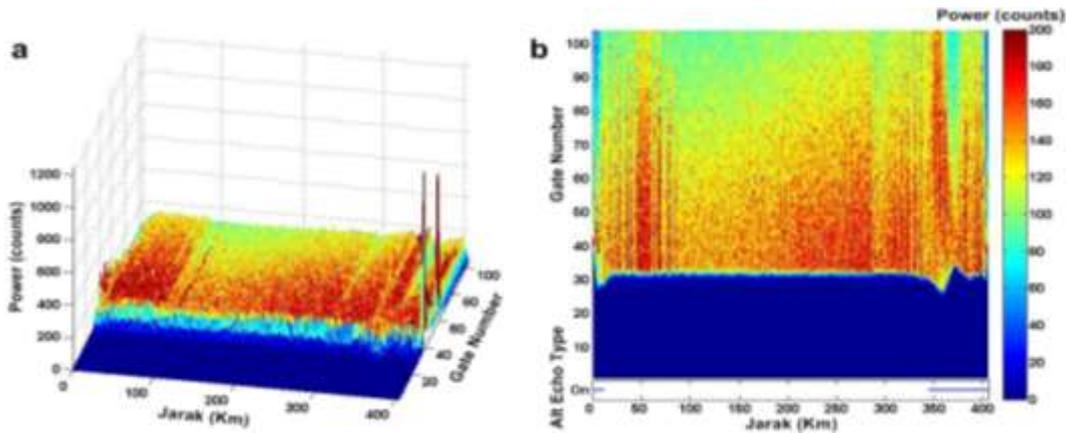
Perairan pesisir yang berada di ujung utara dan selatan pada lintasan 064 *cycle* 229 terlihat memiliki bentuk *non-Brown-waveform*, sedangkan pada bagian tengah Laut Jawa bentuk *waveform*nya sudah berbentuk *Brown-waveform*. Pada gambar 4(a) pada bagian pesisir selatan dari lintasan tersebut terlihat memiliki *power* pantulan yang sangat tinggi hingga mencapai > 1000 *counts* terutama pada jarak 405-405,5 km. Menurut Gommenginger *et al.* (2011) pantulan yang sangat tinggi tersebut karena adanya kontaminsi dari pantulan sinyal dari daratan yang terekam oleh satelit dimana

Tabel 2. Persentase rata-rata *non-Brown-waveform* dari seluruh data *waveform* satelit altimeter Jason-2 tahun 2012-2014 pada setiap lintasan.

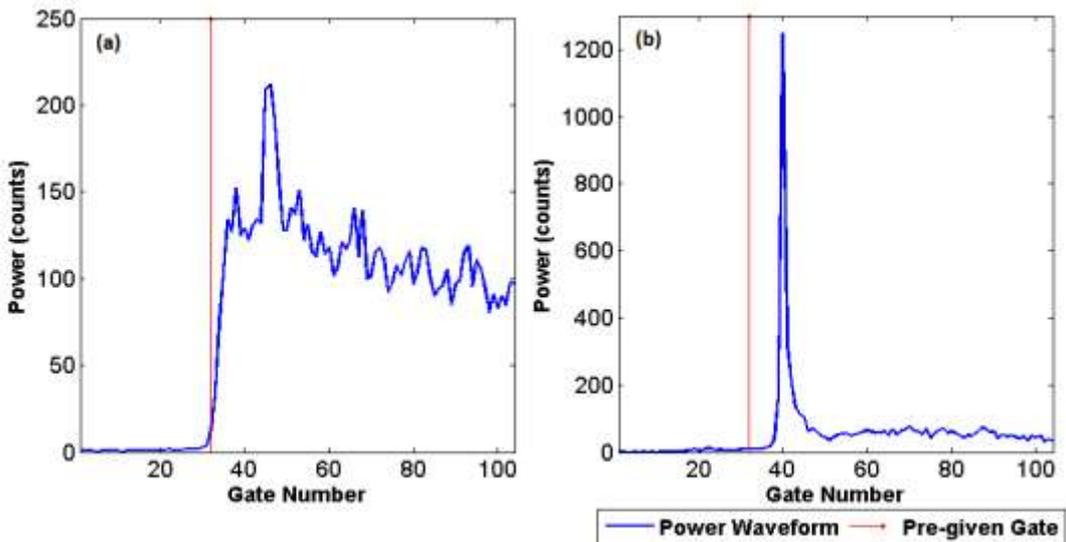
| Nomor lintasan | Panjang lintasan (km) | Jumlah <i>waveform</i> | <i>Non-Brown-waveform</i> (%) |
|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 051 | 426,3 | 1537 | 5,7 |
| 064 | 405,7 | 1463 | 4,9 |
| 127 | 386,0 | 1392 | 5,5 |
| 140 | 423,7 | 1528 | 5,0 |
| 203 | 352,4 | 1271 | 6,9 |
| 216 | 391,0 | 1410 | 5,4 |
| Rata-rata | 397,52 | 1433,5 | 5,6 |

power pantulan sinyal dari daratan lebih tinggi daripada pantulan sinyal dari perairan. Pada gambar tiga dimensi waveform tampak atas (Gambar 4(b)), terlihat pergeseran titik tengah *leading edge* dari gate ke-32 pada jarak 0-11,3 km di daerah pesisir utara dan pada jarak 342,7-405,5 km di daerah pesisir selatan sehingga penanda “*alt echo type*” terlihat aktif (*on*). Dalam estimasi SSH dengan *ocean retracker*, maka hasil estimasi

SSH pada kedua lokasi ini menjadi *NaN* (tidak ada). Pada daerah yang tidak ditandai “*alt echo type*” berarti *ocean retracker* dapat menghasilkan nilai estimasi SSH yang akurat dan diidentifikasi sebagai *Brown-waveform* bilamana titik tengah *leading edge*-nya tepat berada pada *gate ke-32*, dan menghasilkan estimasi SSH yang kurang akurat (*error*) bilamana titik tengah *leading edge*-nya tidak persis berada pada *gate number 32*.



Gambar 4. Bentuk tiga dimensi waveform pada lintasan 064 cycle 229. (a) tampak samping dan (b) tampak atas. Pada gambar (b) terlihat tanda *alt echo type* aktif (*on*) pada jarak sekitar 10 km di kiri dan pada jarak sekitar 70 km di kanan.



Gambar 5. Contoh bentuk *non-Brown-waveform*. (a) bagian bawah dari *leading edge* yang bersinggungan dengan *pre-given gate* (garis warna merah) dimana dengan *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat, dan (b) sinyal pantulan tidak ada yang bersinggungan dengan *pre-given gate* dimana dengan *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH sebagai *NaN*.

Dari bentuk dua dimensi *waveform*, akan terlihat dengan jelas pola *waveform* yang *Brownish*, menyerupai *Brownish*, dan *non-Brownish*. Sebagai contoh, pada Gambar 6 ditampilkan bentuk dua dimensi dari lima *waveform* pertama sepanjang jarak 1,2 km di bagian ujung utara, mendekati bagian tengah, tengah, menjauhi bagian tengah, dan ujung selatan pada lintasan 064 *cycle* 229. Garis merah vertikal yang terlihat pada semua grafik ini menunjukkan “*pre-given gate*” ke-32, sedangkan kurva berwarna biru menunjukkan profil pantulan *power* dari *waveform* yang terbentuk dari *gate* 1 – 104 atau selama 325 ns pengamatan. *Pre-given gate* atau *gate* pengamatan *on-board* adalah *gate* pengamatan yang telah ditentukan oleh satelit altimeter. Pada Satelit Jason-2 *pre-given gate* berada pada *gate* ke-32 (Lee *et al.*, 2010). *Waveform* 1-5 merupakan *waveform* yang berada di ujung utara lintasan 064 (0 – 1,2 km), dimana kelima *waveform* tersebut termasuk kedalam kategori *non-Brown-waveform* karena *pre-given gate* (*gate number* 32) sama sekali tidak bersinggungan dengan *leading edge*-nya dan profil pantulan *power*nya tidak mengikuti pola *Brownish waveform*. Dengan menggunakan *ocean retracker*, kelima *waveform* tersebut akan menghasilkan nilai SSH sebagai *NaN* (tidak ada nilai). *Waveform* nomor 6-10 yang ditemui pada lintasan 064 *cycle* 229 bagian dalam pesisir utara merupakan contoh *waveform* yang termasuk kategori *non-Brown-waveform* karena pola dan bentuk *trailing edge* tidak sesuai dengan pola *trailing edge Brown-waveform*. Akan tetapi, *leading edge waveform* ini sudah bersentuhan dengan *pre-given gate* sehingga *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat.

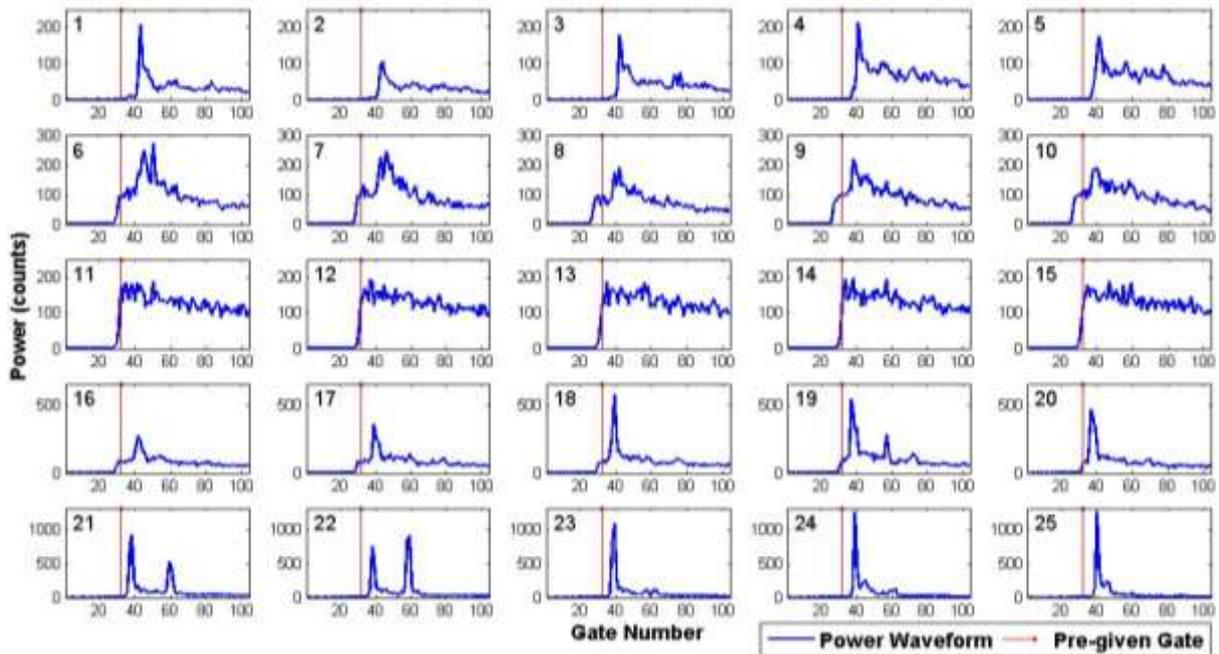
Waveform nomor 11-15 merupakan *waveform* yang berada ditengah lintasan 064 (202,8 – 204 km) dimana kelima *waveform* tersebut sudah berbentuk *Brown-waveform*. Hal ini terlihat jelas dari bentuk *trailing edgenya* sudah menyerupai pola *Brown-waveform* dan titik tengah *leading edge*-nya

sudah tepat berada pada *gate* ke-32 (berhimpit dengan garis *pre-given gate*) (Deng and Featherstone, 2006). Walaupun sudah berbentuk *Brown-waveform* namun bentuk *trailing edge*-nya belum sepenuhnya mengikuti pola *Brown-waveform* (bandingkan dengan pola umum *Brown-waveform* pada Gambar 1) maka hasil estimasi SSH dari *waveform* ini masih kurang akurat. Pola *waveform* seperti ini sering ditemui di perairan dangkal seperti Laut Jawa yang masih dekat dengan daerah pesisir (Nababan *et al.*, 2014). Untuk meningkatkan akurasi hasil estimasi SSH dari bentuk *waveform* seperti ini perlu dilakukan analisis *retracking waveform* (Hwang *et al.*, 2006).

Bentuk dua dimensi *waveform* nomor 16-20 yang terletak pada jarak 404,3 – 405,5 km (mendekati garis pantai utara Jawa) pada lintasan 064 berbentuk *non-Brown-waveform*. Pada *waveform* ini ditemui satu puncak yang dominan, *pre-given gate* sudah bersinggungan dengan *leading edge*, dan *trailing edge* sama sekali tidak menyerupai *trailing edge Brown-waveform*. Dengan demikian, kelima *waveform* ini juga akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat (*error*). Lima *waveform* kelima (21-25) merupakan contoh *waveform* yang termasuk kategori *non-Brown-waveform* yang terdapat di pesisir selatan lintasan dan *pre-given gate* tidak bersinggungan dengan *leading edge* sehingga *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH sebagai *NaN*. *Power* pantulan yang lebih besar pada pesisir selatan lintasan 064 dibandingkan dengan pesisir utaranya menunjukkan pesisir selatan memiliki pengaruh *noise* dari daratan yang lebih tinggi (Gommenginger *et al.*, 2011).

3.2. Peningkatan Perbaikan Estimasi SSH

Nilai *improvement percentage* (IMP) dihitung dari persentase antara standar deviasi dari selisih SSH *on-board* (*ocean retracker*) dengan geoid dan standar deviasi dari selisih SSH *retracking* dengan geoid dibagi dengan standar deviasi dari selisih SSH *on-board* dengan geoid. Hasil penelitian



Gambar 6. Bentuk dua dimensi *waveform* pada lintasan pengamatan 064 *cycle* 229. Lima *waveform* pertama (1-5) di pesisir utara lintasan menghasilkan estimasi nilai SSH sebagai *NaN*; lima *waveform* kedua (6-10) di daerah pesisir utara mengarah ke laut lepas akan menghasilkan nilai SSH yang kurang akurat (*error*), lima *waveform* ketiga (11-15) yang ditemui di tengah perairan Laut Jawa yang merupakan *Brown-waveform*; lima *waveform* keempat (16-20) yang ditemui di pesisir selatan bagian tengah akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat (*error*), dan lima *waveform* kelima (21-25) yang ditemui pada pesisir selatan akan menghasilkan nilai estimasi SSH sebagai *NaN*.

ini menunjukkan bahwa dalam satu lintasan saja selama tahun 2012 – 2013 (*cycle* 129 – 239) tidak ada *retracker* yang dominasinya lebih dari 65% (Tabel 3). Hal ini disebabkan Laut Jawa merupakan perairan dangkal (<200 m) sehingga lebih dinamis jika dibandingkan dengan laut lepas yang merupakan perairan dalam. Adanya angin yang sangat kencang akan mudah membuat perairannya menjadi beriak dan teraduk hingga hampir ke dasar berbeda dengan laut lepas yang memiliki kedalaman perairan hingga ribuan meter. Menurut Deng and Featherstone (2006) kekasaran bentuk permukaan laut turut memberikan *noise* terhadap *waveform* yang terbentuk menyebabkan *waveform* tersebut menjadi lebih sulit untuk dianalisis. Setiap *retracker* masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan

yang bersifat spesifik dengan daerah kajiannya sehingga setiap *retracker* memiliki performa yang berbeda-beda tergantung karakteristik perairannya (Guo *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2008). Hal inilah yang menyebabkan di Laut Jawa tidak bisa hanya diwakili oleh satu *retracker* terbaik saja untuk mengestimasi nilai SSH dalam satu lintasannya, tetapi harus digabungkan dari setiap *retracker* terbaik dari setiap *cycle* nya.

Setiap *cycle* dari semua lintasan satelit altimeter Jason-2 dapat memiliki data yang berbeda. Pada beberapa *cycle* terdapat beberapa kekosongan data yang diduga disebabkan oleh kesalahan sensor satelit yang gagal dalam merekam pantulan sinyal satelit dari permukaan. Hal ini menyebabkan jumlah data setiap *cycle* menjadi berbeda-beda pada setiap lintasan. Total jumlah *cycle*

Tabel 3. Statistik *retracking waveform* di sepanjang lintasan pengamatan selama tahun 2012 – 2014. *Retracker* yang paling baik ditunjukkan dengan cetak tebal (dominasi tertinggi).

| Lintasan | Retracker | Jumlah <i>cycle</i> | Dominasi (%) | Rataan IMP | Lintasan | Retracker | Jumlah <i>cycle</i> | Dominasi (%) | Rataan IMP |
|----------|---------------|------------------------|-----------------|---------------|----------|---------------|------------------------|-----------------|---------------|
| 051 | Threshold 10% | 56 | 57,1 | 61,0 | 140 | Threshold 10% | 19 | 25,7 | 57,5 |
| | Threshold 20% | 16 | 16,3 | 49,6 | | Threshold 20% | 14 | 18,9 | 40,6 |
| | Threshold 50% | 4 | 4,1 | 43,6 | | Threshold 50% | 13 | 17,6 | 32,8 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 10% | 6 | 6,1 | 63,1 | | Threshold 10% | 7 | 9,5 | 52,9 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 20% | 6 | 6,1 | 68,5 | | Threshold 20% | 4 | 5,4 | 52,4 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 50% | 1 | 1,0 | 14,6 | | Threshold 50% | 0 | 0,0 | 0,0 |
| | Ice | 9 | 9,2 | 47,3 | | Ice | 17 | 23,0 | 40,5 |
| OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | | |
| Jumlah | 98 | 100,0 | | Jumlah | 74 | 100,0 | | | |
| 064 | Threshold 10% | 50 | 48,1 | 61,5 | 203 | Threshold 10% | 8 | 12,7 | 53,7 |
| | Threshold 20% | 12 | 11,5 | 53,1 | | Threshold 20% | 6 | 9,5 | 65,7 |
| | Threshold 50% | 2 | 1,9 | 35,2 | | Threshold 50% | 23 | 36,5 | 31,9 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 10% | 21 | 20,2 | 60,2 | | Threshold 10% | 3 | 4,8 | 58,2 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 20% | 2 | 1,9 | 51,7 | | Threshold 20% | 5 | 7,9 | 63,1 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 50% | 0 | 0,0 | 0,0 | | Threshold 50% | 5 | 7,9 | 41,9 |
| | Ice | 17 | 16,3 | 48,1 | | Ice | 13 | 20,6 | 46,5 |
| OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | | |
| Jumlah | 104 | 100,0 | | Jumlah | 63 | 100,0 | | | |
| 127 | Threshold 10% | 11 | 11,5 | 47,0 | 216 | Threshold 10% | 26 | 27,4 | 69,4 |
| | Threshold 20% | 11 | 11,5 | 40,6 | | Threshold 20% | 8 | 8,4 | 66,2 |
| | Threshold 50% | 21 | 21,9 | 54,3 | | Threshold 50% | 2 | 2,1 | 44,1 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 10% | 6 | 6,3 | 55,3 | | Threshold 10% | 22 | 23,2 | 66,9 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 20% | 14 | 14,6 | 61,3 | | Threshold 20% | 7 | 7,4 | 62,5 |
| | Improved | | | | | Improved | | | |
| | Threshold 50% | 3 | 3,1 | 58,9 | | Threshold 50% | 1 | 1,1 | 59,3 |
| | Ice | 30 | 31,3 | 56,7 | | Ice | 29 | 30,5 | 62,8 |
| OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | OCO | 0 | 0,0 | 0,0 | | |
| Jumlah | 96 | 100,0 | | Jumlah | 95 | 100,0 | | | |

yang dapat diamati selama tahun 2012-2014 dari setiap lintasan yang paling lengkap terdapat pada lintasan 064 yang berjumlah 104 *cycle*, sedangkan, yang terendah terdapat pada lintasan 203 yang berjumlah 63 *cycle*. Pada lintasan 051 *retracker Threshold 10%* menjadi yang paling dominan karena sebanyak 56 *cycle* dari total 98 *cycle* yang dapat diamati (57,1%), menghasilkan nilai IMP yang paling tinggi pada setiap *cycle*-nya dengan rataannya sebesar 61,0%. Pada lintasan 064, 127, 140, 203, dan 216 masing-masing *retracker* yang paling dominan secara

berturut-turut adalah: *Threshold 10%* (48,1%) dengan rataannya IMP 61,5 %; *Ice* (31,3%) dengan rataannya IMP 56,7 %; *Threshold 10%* (25,7%) dengan rataannya IMP 57,5 %; *Threshold 50%* (36,5%) dengan rataannya IMP 31,9%; dan *Ice* (30,5%) dengan rataannya IMP 62,8% (Tabel 3). Dengan demikian dari seluruh data setiap *cycle* dari semua lintasan pengamatan selama tahun 2012 – 2014 di Laut Jawa maka *retracker Threshold 10%* adalah yang paling konsisten memiliki performa *retracker* yang paling baik. Sedangkan, *retracker OCOG* dari setiap

cycle-nya pada semua lintasan tidak ada satu pun yang memiliki nilai IMP terbaik sehingga *retracker* ini kosnsisten menjadi *retracker* yang paling buruk untuk diterapkan dalam mengestimasi SSH di Laut Jawa.

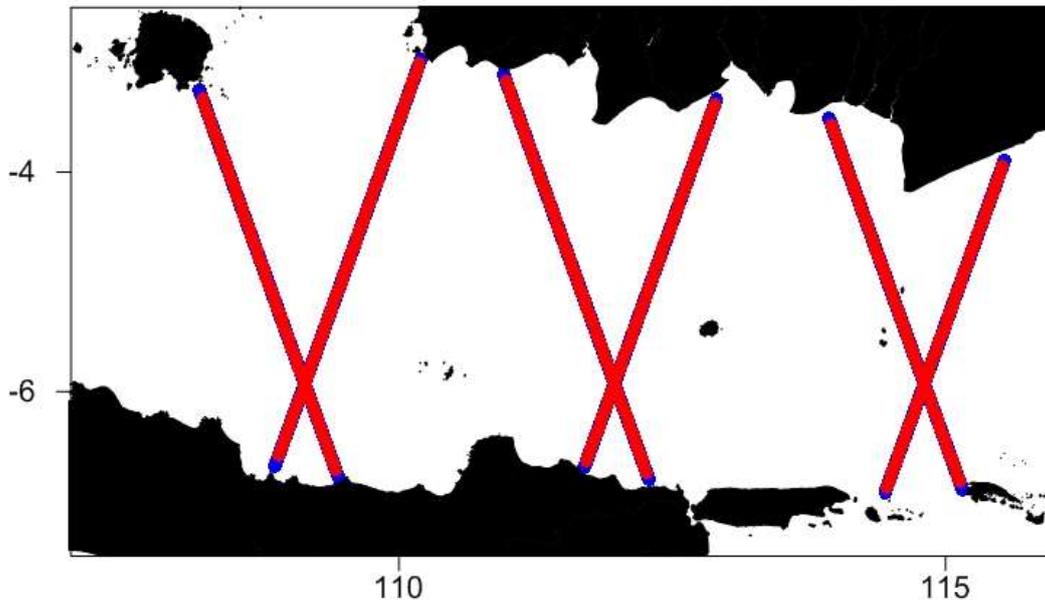
Brown-waveform ditemui paling dekat dengan garis pantai di pesisir utara pada jarak 8,5 km dari garis pantai di lintasan 140, sedangkan di pesisir selatan *Brown-waveform* ditemui paling dekat dengan garis pantai pada jarak 6,0 km dari garis pantai di lintasan 216. Peningkatan tertinggi jarak estimasi SSH setelah dilakukan analisis *retracking waveform* pada pesisir utara terdapat pada lintasan 140 dimana jarak estimasi SSH semula dimulai pada jarak sekitar 8,5 km kemudian dapat ditingkatkan sampai jarak 4,8 km dari garis pantai (43,5%), sedangkan peningkatan tertinggi jarak estimasi SSH pada pesisir selatan terdapat pada lintasan 127 dimana jarak estimasi SSH semula dimulai pada jarak sekitar 9,6 km kemudian dapat ditingkatkan sampai jarak 2,2 km dari garis pantai (77,1%) (Tabel 4). Pada Tabel 4 juga terlihat bahwa di pesisir utara bentuk *Brown-waveform* secara umum ditemui lebih jauh dari garis pantai (rata-rata 12,6 km) dibandingkan dengan di daerah peisir selatan (rata-rata 8,7 km). Setelah dilakukan analisis *retracker* terhadap *non-Brown-waveform* pada setiap

lintasan di daerah pesisir, diperoleh peningkatan akurasi estimasi SSH berdasarkan jarak dan persentase dari garis pantai untuk daerah pesisir utara dengan jarak perbaikan rata-rata 3,7 km (29,7%) dan di daerah pesisir selatan dengan jarak rata-rata 4,9 km (56,4%) (Tabel 4; Gambar 7). Peningkatan akurasi estimasi SSH ditemui lebih tinggi di pesisir selatan dibandingkan di pesisir utara dimana garis pantai di pesisir selatan cenderung relatif lebih lurus dibandingkan garis pantai di pesisir utara yang relatif lebih kompleks. Hasil ini sesuai dengan temuan Deng and Featherstone (2006) dimana pada pantai yang bentuknya kompleks memiliki *noise* yang lebih besar dibandingkan pada pantai yang garis pantainya cenderung sejajar.

Berdasarkan analisis bentuk *waveform* dari seluruh lintasan satelit altimeter Jason-2 di Laut Jawa selama 3 tahun (2012-2014), umumnya ditemui *non-Brown-waveform* pada jarak rata-rata 12,6 km dari garis pantai di daerah pesisir utara dan pada jarak rata-rata 8,7 km dari garis pantai di daerah pesisir selatan (lihat Tabel 4). Pada saat *pre-given gate* tidak tepat memotong pada titik tengah *leading edge* (peningkatan *power* pantulan), tetapi hanya bersinggungan pada bagian bawah atau bagian atas dari *leading edge*, maka umumnya *ocean retracker* akan menghasilkan estimasi SSH

Tabel 4. Peningkatan akurasi estimasi SSH berdasarkan jarak dan persentase dari garis pantai satelit altimeter Jason-2 setelah analisis *retracking waveform* untuk semua lintasan selama 3 tahun (2012 – 2014).

| Lintasan | Pesisir utara | | | | Pesisir selatan | | | |
|-----------|---------------|------------|----------------|---------------|-----------------|------------|----------------|---------------|
| | Awal (km) | Akhir (km) | Perbaikan (km) | Perbaikan (%) | Awal (km) | Akhir (km) | Perbaikan (km) | Perbaikan (%) |
| 051 | 12,8 | 8,4 | 4,4 | 34,4 | 10,5 | 4,8 | 5,7 | 54,3 |
| 064 | 12,0 | 8,2 | 3,8 | 31,7 | 7,1 | 4,1 | 3,0 | 42,3 |
| 127 | 10,9 | 9,1 | 1,8 | 16,5 | 9,6 | 2,2 | 7,4 | 77,1 |
| 140 | 8,5 | 4,8 | 3,7 | 43,5 | 12,1 | 6,2 | 5,9 | 48,8 |
| 203 | 17,1 | 12,6 | 4,6 | 26,3 | 6,7 | 2,6 | 4,1 | 61,2 |
| 216 | 14,1 | 10,5 | 3,6 | 25,5 | 6,0 | 2,7 | 3,3 | 55,0 |
| Rata-rata | 12,6 | 8,9 | 3,7 | 29,7 | 8,7 | 3,8 | 4,9 | 56,4 |

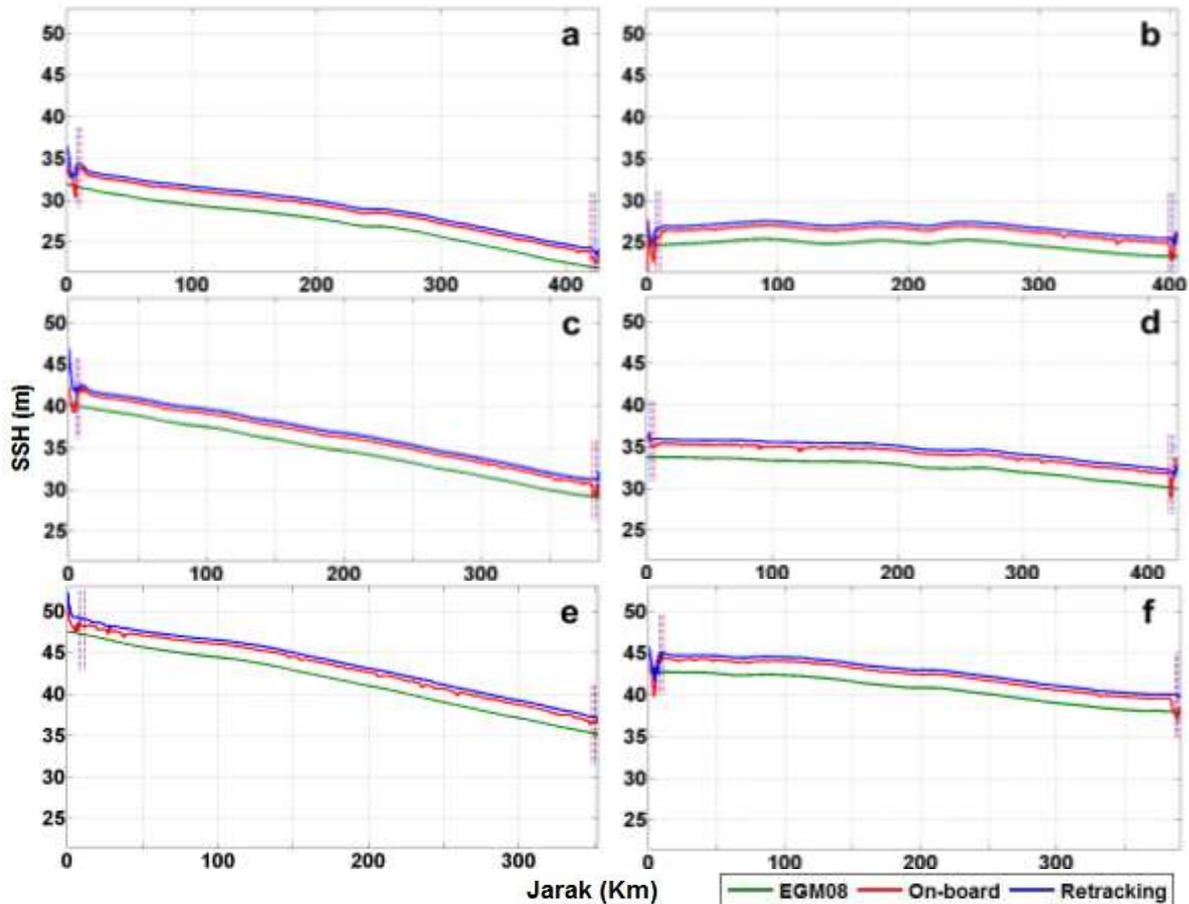


Gambar 7. Perbandingan panjang lintasan SSH sebelum (merah) dan sesudah analisis *retracking waveform* (merah + biru).

yang kurang akurat seperti terlihat pada grafik bagian kiri dan kanan yang diberi tanda garis putus-putus warna merah pada Gambar 8. Estimasi SSH yang kurang akurat menurut Hwang *et al.* (2006) dan Lee *et al.* (2010) akan bersifat fluktuatif terhadap profil geoidnya dan apabila diamati bentuk *waveformnya* maka masih terdapat bentuk-bentuk yang *non-Brown-waveform* namun ada bagian dari *leading edge*-nya yang bersinggungan dengan garis *pre-given gate*.

Berdasarkan hasil analisis *retracking waveform*, estimasi SSH terbaik disajikan pada Gambar 8 (warna biru). Dari hasil ini terlihat ada perbaikan hasil estimasi SSH dari *ocean retracker* khususnya pada daerah pesisir (garis putus-putus warna biru pada Gambar 8). Perbaikan estimasi SSH berdasarkan *retracking waveform* pada dasarnya menyerupai pola geoidnya. Oleh karena itu, profil SSH yang dihasilkan perlu difilter khususnya pada bagian pesisirnya (utara dan selatan) agar nilai estimasi SSH pada wilayah pesisir tersebut dapat lebih valid. Pemfilteran pada bagian pesisir utara dan selatan inilah yang menjadi acuan dalam penentuan panjang lintasan estimasi SSH baik pada *on-board* maupun *retracking* (lihat Gambar 7).

Gambar 8 menunjukkan profil rata-rata SSH *on-board* dan rata-rata SSH *retracking* pada semua lintasan pengamatan mengalami fluktuasi pada daerah pesisir pada jarak awal dan akhir dari setiap grafik (ujung utara dan selatan lintasan pengamatan). Terjadinya fluktuasi tersebut menandakan bahwa pengukuran SSH terpengaruh oleh *noise* dari pantulan sinyal daratan. SSH *retracking* memiliki profil grafik yang lebih halus jika dibandingkan dengan SSH *on-board* dimana kehalusan tampilan profil tersebut dapat dihitung dengan IMP sehingga semakin tinggi nilai IMP-nya maka akan semakin halus profilnya. Profil yang halus menandakan bahwa *noise* dari daratan maupun dari kekasaran permukaan laut dapat dihilangkan seminimal mungkin sehingga estimasi SSH oleh satelit altimeter Jason-2 dapat ditingkatkan akurasi. Hasil Perbandingan profil SSH *retracking* dengan SSH *on-board* menunjukkan bahwa analisis *retracking waveform* telah mampu mengurangi pengaruh *noise* dari daratan maupun dari kekasaran bentuk permukaan laut sehingga tampilan profilnya menjadi lebih halus daripada tampilan profil SSH *on-board*. Fluktuasi grafik yang meningkat



Gambar 8. Perbandingan profil estimasi SSH hasil *retracking* vs. *on-board* terhadap profil undulasi geoid EGM08 selama tahun 2012 – 2014 di Laut Jawa pada setiap lintasan pengamatan. (a) 051; (b) 064; (c) 127; (d) 140; (e) 203; dan (f) 216.

dan menurun secara tajam juga dapat diminimalkan sehingga lebih menyerupai profil undulasi geoidnya. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa analisis *retracking waveform* telah berhasil meningkatkan akurasi SSH *on-board* pada daerah pesisir Laut Jawa.

Profil SSH *on-board* untuk semua lintasan terlihat selalu berada di bawah profil *retracking* hal ini disebabkan karena *on-board* menggunakan *gate* pengamatan yang telah ditetapkan (*gate* ke-32) berdasarkan model *Brown-waveform* yang biasa terbentuk di laut lepas (Lee *et al.*, 2010). Sedangkan, pada analisis *retracking* nilai *gate* pengamatan ditentukan dengan melakukan pendekatan statistik berdasarkan perhitungan antara lebar *gate* dengan lebar amplitudonya sehingga nilai *gate* pengamatan menjadi berubah-ubah sesuai dengan bentuk *leading*

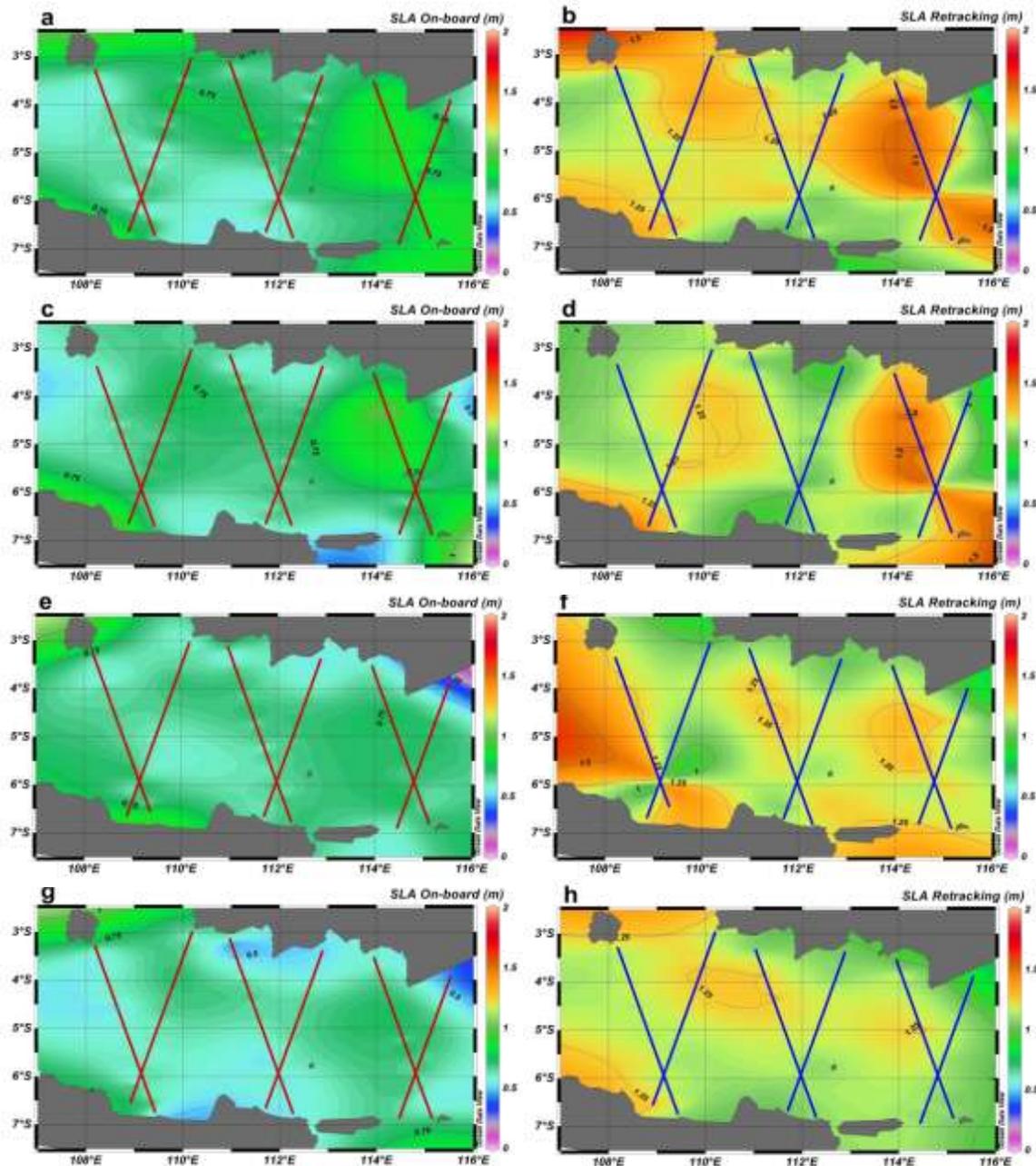
edge pada setiap *waveform* yang diamati (Guo *et al.*, 2010). Pada kasus Laut Jawa menunjukkan bahwa nilai *gate* pengamatan yang digunakan oleh analisis *retracking* rata-rata lebih rendah dibandingkan dengan yang digunakan oleh *on-board* (< 32). Hal inilah yang menyebabkan estimasi SSH oleh *retracking* menjadi lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil SSH *on-board*. Oleh karena itu, di laut dangkal (seperti Laut Jawa) walaupun sudah *Brown-waveform* disarankan tetap melakukan analisis *retracking waveform* untuk mendapatkan hasil pengamatan SSH yang lebih akurat (Hwang *et al.*, 2006).

3.3. Sebaran Spasial Permukaan SLA

Nilai SLA didapatkan dari selisih antara nilai SSH dengan MSS kemudian

dikurangi dengan koreksi geofisik untuk menghilangkan *noise*. Nilai SLA menunjukkan kondisi topografi dari permukaan laut yang sebenarnya (Dumont *et al.*, 2011). Dikarenakan SSH pada *retracking* menunjukkan nilai estimasi yang lebih baik dibandingkan dengan SSH *on-board* maka hasil perhitungan SLA *retracking* dianggap

lebih mendekati kondisi permukaan laut yang sebenarnya dibandingkan SLA *on-board*. Sebaran spasial permukaan SLA hasil *retracking* menunjukkan nilai sebaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai sebaran spasial SLA *on-board* pada setiap musimnya selama tahun 2012-2014 (Gambar 9). Nilai rata-rata SLA *retracking* pada



Gambar 9. Sebaran spasial permukaan SLA *on-board* (kolom kiri) dan SLA *retracking* terbaik (kolom kanan) selama tahun 2012-2014 pada musim barat (a, b), musim peralihan I (c, d), musim timur (e, f), serta musim peralihan II (g, h).

Musim Barat (Desember-Februari); Musim Peralihan I (Maret-Mei); Musim Timur (Juni-Agustus); dan Musim Peralihan II (September-Oktober) masing-masing sebesar 1,24 m; 1,19 m; 1,18 m; dan 1,15 m. Sedangkan, nilai rata-rata SLA *on-board* masing-masing sebesar 0,71 m; 0,71 m; 0,67 m; dan 0,62 m. Dengan demikian, SLA *on-board* hasil estimasi satelit altimeter Jason-2 bersifat *under estimate* terhadap nilai dugaan SLA yang sebenarnya.

Pada Gambar 9 baik pada sebaran spasial permukaan SLA *on-board* maupun SLA *retracking* menunjukkan perubahan pola SLA pada setiap musimnya. Pada musim barat terlihat pada Laut Jawa bagian timur memiliki sebaran SLA yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pada Laut Jawa bagian barat (Gambar 9a, 9b). Pada musim peralihan I, pola sebaran SLA masih mengikuti pola sebaran seperti musim barat namun nilainya terlihat semakin berkurang (Gambar 9c, 9d). Hal ini menunjukkan telah terjadi pergerakan massa air dari barat menuju timur (Laut Cina Selatan menuju Laut Jawa) selama periode Musim Barat dan Peralihan I ini berlangsung.

Pada Musim Timur terlihat hal yang sebaliknya dimana pola sebaran SLA pada Laut Jawa bagian barat lebih tinggi dibandingkan pada Laut Jawa bagian timur (Gambar 9e, 9f). Sedangkan, pada musim peralihan II, pola sebaran SLA masih mengikuti pola sebaran SLA pada musim timur dengan nilai yang relatif lebih rendah (Gambar 9g, 9h). Hal ini menunjukkan telah terjadi pergerakan massa air dari timur menuju barat selama periode musim timur dan musim peralihan II. Fenomena pada musim barat dan peralihan I berbanding terbalik dengan apa yang terjadi pada musim timur dan peralihan II. Hal ini dikarenakan adanya pergerakan Angin Muson Barat dan Angin Muson Timur di perairan Indonesia (Nababan *et al.*, 2016; Atmadipoera and Widyastuti, 2014; Habibi *et al.*, 2010). Wilopo (2005) telah membuktikan dengan menggunakan analisis spektrum silang

bahwa angin memiliki hubungan yang kuat terhadap perubahan SLA sehingga pergantian antara Musim Barat dan Musim Timur dengan Musim Peralihannya (musiman) sangat mempengaruhi perubahan SLA.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis pola atau bentuk *waveform*, umumnya pola *non-Brown-waveform* ditemui di daerah pesisir sedangkan pola *Brown-waveform* ditemui diperairan lepas pantai (*offshore*). Jumlah rata-rata *waveform* setiap lintasan satelit altimeter Jason-2 di Laut Jawa dengan jarak rata-rata sekitar 397,5 km adalah 1433,5 buah *waveform* dan dari jumlah ini ditemui pola *non-Brown-waveform* sebanyak rata-rata 5,6% (79,5 buah *waveform*) setiap lintasan. Pada setiap *non-Brown-waveform* dimana *pre-given gate* tidak bersinggungan dengan *leading edge waveform*, maka *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH sebagai NaN (tidak ada nilai). Sedangkan, setiap *non-Brown-waveform* dimana *pre-given gate* bersinggungan dengan *leading edge waveform* namun tidak tepat berada pada gate ke-32, maka *ocean retracker* akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat (*error*).

Hasil pengamatan satelit altimeter Jason-2 (lintasan 051, 064, 127, 140, 203, dan 216; *cycle* 129-239) selama 3 tahun (2012-2014) di Laut Jawa, hasil analisis *retracking waveform* berhasil meningkatkan kemampuan tingkat akurasi estimasi SSH rata-rata 29,7% (rata-rata sepanjang 3,7 km dari 12,6 km rata-rata panjang lintasan) di pesisir utara dan rata-rata 56,4% (rata-rata sepanjang 4,9 km dari 8,7 km rata-rata panjang lintasan) di pesisir selatan. Peningkatan perbaikan estimasi SSH lebih baik di daerah pesisir selatan dibandingkan di daerah pesisir utara disebabkan garis pantai di daerah pesisir selatan relatif lebih lurus dibandingkan di daerah pesisir utara yang lebih bergelombang.

Berdasarkan perhitungan IMP dari semua *cycle* pada semua lintasan pengamatan maka didapatkan *retracker Threshold* 10% sebagai *retracker* yang paling baik performanya untuk diterapkan di Laut Jawa karena merupakan *retracker* yang paling konsisten dengan mendominasi pada tiga lintasan pengamatan, dengan persentase dominasi pada masing-masing lintasan sebesar 57,1% (051); 48,1% (064); dan 25,7% (127). Sedangkan, *retracker* OCOG menjadi *retracker* yang paling buruk untuk diterapkan dalam mengestimasi SSH di Laut Jawa karena dari setiap *cycle*-nya pada semua lintasan tidak ada satu pun yang memiliki nilai IMP tertinggi. Hasil perbandingan antara profil SSH *on-board* dengan SSH *retracking* menunjukkan bahwa analisis *retracking waveform* telah berhasil meningkatkan akurasi dari estimasi SSH *on-board* satelit altimeter Jason-2 dimana profil SSH *retracking* lebih halus dan lebih menyerupai profil geoid jika dibandingkan dengan profil SSH *on-board*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi melalui Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN). Penulis mengucapkan terima kasih kepada anonim *reviewer* atas masukannya yang sangat berharga dalam meningkatkan kualitas paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, D. 2013. Waveform retracking Satelit Jason-2 pada pesisir selatan Jawa Tengah dan Jawa Barat. Skripsi. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 37hlm.
- Andersen, O.B. and R. Scharroo. 2011. Range and geophysical corrections in coastal regions: and implications for mean sea surface determination. *In: Vignudelli, S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.). Coastal Altimetry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 104-142pp. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_5.*
- Anzenhofer, M., C.K. Shum, and M. Rentsh. 1999. Coastal altimetry and applications. Tech. Rep. No. 464. Geodetic Science and Surveying. The Ohio State University. Columbus, USA. 36p.
- Atmadipoera, A.S. and P. Widyastuti. 2014. A numerical modeling study on upwelling mechanism in South of Makassar Strait. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(2):355-371.
- Bamber, J.L. 1994. Ice sheet altimeter processing scheme. *Int. J. Remote Sens.*, 15:925-938.
- Bao, L., Y. Lu, and Y. Wang. 2008. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Progress in Natural Science*, 19:195-203.
- Benveniste, J. 2011. Radar altimetry: past, present and future. *In: Vignudelli, S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.). Coastal Altimetry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1-17pp. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_5.*
- Birkett, C., C. Reynolds, B. Beckley, and B. Doorn. 2011. From research to operations: the USDA global reservoir and lake monitor. *In: Vignudelli, S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.). Coastal Altimetry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 19-50pp. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_2.*
- Brown, G.S. 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 25:67-74.
- Chelton, D.B., J.C. Ries, B.J. Haines, L. Fu, and P. Callahan. 2001. Satellite alti-

- metry. *In*: Fu, L. and A. Cazenave (eds.). Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications. International Geophysics Series Volume 69. Academic Press. San Diego. 1-132pp.
- Davis, C.H. 1995. Growth of the greenland ice sheet: a performance assessment of altimeter retracking algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(5):1108-1116.
- Deng, X. and W.E. Featherstone. 2006. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: application to ERS-2 around Australia. *J. of Geophys. Res.*, 111. DOI: 10.1029/2005JC003039.
- Dumont, J.P., V. Rosmorduc, N. Picot, E. Bronner, S. Desai, H. Bonekamp, J. Figa, J. Lillibridge, and R. Scharoo. 2011. OSTM/Jason-2 products handbook. http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j2.pdf. [Retrieved on 20 July 2015].
- Fenoglio-Marc, L., M. Fehla, L. Ferri, M. Becker, Y. Gao, and S. Vignudelli. 2010. Coastal sea surface heights from improved altimeter data in the Mediterranean Sea. *In*: Mertikas, S.P. (ed.). *Gravity, Geoid and Earth Observation, International Association of Geodesy Symposia 135*. DOI: 10.1007/978-3-642-10634-7_33.
- Gommenginger, C., P. Thibaut, L. Fenoglio-Marc, G. Quartly, X. Deng, J. Gomez-Enri, P. Challenor, and Y.G. Gao. 2011. Retracking altimeter waveforms near the coasts. *In*: Vignudelli, S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.). *Coastal Altimetry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 61-101pp. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_4.
- Guo, J.Y., Y.G. Gao, C. Hwang, and J.L. Sun. 2010. A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans. *Science China – Earth Sciences*, 53:610-616. DOI: 10.1007/s11430-009-0171-3.
- Habibi, A., R.Y. Setiawan, and A.Y. Zuhdy. 2010. Wind-driven coastal upwelling along South of Sulawesi Island. *Indonesian J. of Marine Science*, 15(2):115-118.
- Hwang, C., J.Y. Guo, X. Deng, H.Y. Hsu, and Y.T. Liu. 2006. Coastal gravity anomalies from retracking Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data. *J. Geod.*, 80:204-216.
- Lambin, J., R. Morrow, L. Fu, J.K. Willis, H. Bonekamp, J. Lillibridge, J. Perbos, G. Zaouche, P. Vaze, W. Bannoura, F. Parisot, E. Thouvenot, S. Coutin-Faye, E. Lindstorm, and M. Minogno. 2010. The OSTM/Jason-2 mission. *Marine Geodesy*, 33(S1):4-25. DOI: 10.1080/01490419.2010.488982.
- Lee, H., C.K. Shum, W. Emery, S. Calmant, X. Deng, C.Y. Kuo, C. Roesler, and Y. Yi. 2010. Validation of Jason-2 altimeter data by waveform retracking over California coastal ocean. *Marine Geodesy*, 33(S1):304-316. DOI: 10.1080/01490419.2010.488982.
- Nababan, B., S. Hadianti, dan N.M.N. Natih. 2015. Dinamika anomali paras laut perairan Indonesia. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1):259-272.
- Nababan, B., N. Rosyadi, D. Manurung, N.M. Natih, and R. Hakim. 2016 (*in press*). The seasonal variability of sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in the south of Makassar Strait. *Procedia Environmental Science*.
- Nababan, B., M.R. Hakim, D. Adrian, dan J.L. Gaol. 2014. Identifikasi waveform data satelit altimeter pada perairan pesisir dan laut dalam di perairan selatan Jawa. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(2):445-459.

- Quartly, G.D., M.A. Srokosz, and A.C. McMillan. 2001. Analyzing altimeter artifacts: statistical properties of ocean waveforms. *J. of Atmospheric and Ocean Technology*, 18:2074-2091.
- Rosmorduc, V., J. Benveniste, E. Bronner, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milargo, and N. Picot. 2011. Radar altimetry tutorial. <http://www.altimetry.info>. [Retrieved on 20 July 2015].
- Wijaya, B.J. 2015. Evaluasi ketelitian hasil retracking data waveform satelit altimeter (studi kasus: perairan Pulau Jawa). Skripsi. Program Studi Teknik geodesi. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Williams, S.J. 2013. Sea-level rise implications for coastal regions. *J. of Coastal Research*, 63(S1):184-196. DOI:10.2112/SI63-015.1.
- Wingham D.J., C.G. Rapley, and H. Griffiths. 1986. New techniques in satellite tracking system. *Prosiding Simposium IGARSS' 86*. Zurich. 1339-1344pp.
- Yang, Y., C. Hwang, H.J. Hsu, E. Dongchen, and H. Wang. 2012. A subwaveform threshold retracker for ERS-1 altimetry: a case study in the Antarctic Ocean. *Computers & Geosciences*, 41:88-98. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.08.017.
- Yang, L., M. Lin, Y. Bai, and D. Pan. 2008. Retracking Jason-1 altimeter waveform over China coastal sea. *In: Valinia, A., P.H. Hildebrand, and S. Uratsuka (eds.)*. Proc. of SPIE vol. 7154, Microwave remote sensing of the atmosphere and environment VI 71540K, Noumea, New Caledonia, 9 December 2008. DOI: 10.1117/12.804835.

Diterima : 23 Oktober 2015
Direview : 17 Desember 2015
Disetujui : 30 Desember 2015