

ANALISIS RETRACKING WAVEFORM DATA SATELIT ALTIMETER PADA TELUK, PERAIRAN PULAU-PULAU KECIL, DAN LAUT DALAM DI LAUT HALMAHERA

WAVEFORM RETRACKING ANALYSES OF ALTIMETRY SATELLITE DATA AROUND GULF, SMALL ISLANDS, AND DEEP WATERS IN HALMAHERA SEA

Maya Eria Br Sinurat^{1*}, Bisman Nababan² dan Jonson Lumban Gaol²

¹Program Studi Teknologi Kelautan, Pascasarjana, FPIK-IPB, Bogor, 16680, Indonesia

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB, Bogor, 16680, Indonesia

*E-mail: maya_eriabrsinurat@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

The accuracy of sea surface height (SSH) estimation from altimeter satellites is strongly influenced by waters condition and coastal land. In general, SSH estimations in offshore are accurate. However, in coastal waters, SSH estimation are inaccurate due to the reflection of signal from land. The study purpose was to retrack the waveform of Altimeter satellites in a complex the Halmahera Sea. The data used for this study were the waveform Sensor Geophysical Data Record type D (SGDR-D) of Jason-2 and Jason-3 of 2017. To retrack waveform, we used several algorithms i.e., Offset Centre of Gravity (OCOG), Iced, Threshold, and Improved Threshold. All retracker provided significant improvement in SSH estimations except OCOG. The best retracker used in Halmahera Sea for the shallow and narrow bay was Threshold 10%, for the deep and wide bay was Threshold 50%, and for small islands waters were Threshold 10% and Threshold 20%. In general, Non-Brown waveforms were more common in the shallow and narrow bay waters (average=63.49%) vs. the deep and wide bay waters (average=11.51%) and small island waters (average=9.57%). However, the improvement percentage of SSH estimations in the shallow and narrow bay waters was higher than the deep and wide bay waters and small islands waters. The best retracker in the Halmahera Sea was the Threshold 10% algorithm with the IMP value of 96.71% on Jason-2 pass 164.

Keywords: altimetry, Jason-2, Jason-3, retracking, waveform

ABSTRAK

Akurasi estimasi tinggi muka laut (SSH) dari satelit altimeter sangat dipengaruhi oleh kondisi perairan dan daratan disekitar perairan tersebut. Estimasi SSH di laut lepas umumnya sudah akurat. Namun, pada daerah pantai, estimasi SSH kurang akurat karena gangguan pantulan sinyal dari daratan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis *retracking waveform* satelit altimeter pada perairan yang kompleks di Laut Halmahera. Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data *waveform* dari *Sensor Geophysical Data Record type D* (SGDR-D) Jason-2 dan Jason-3 tahun 2017. Algoritma *retracking* yang digunakan yaitu *Offset Centre of Gravity* (OCOG), *Iced*, *Threshold*, dan *Improved Threshold*. Hasil *retracking waveform* menunjukkan semua *retracker* memberikan perbaikan data SSH yang signifikan kecuali OCOG. *Retracker* yang paling cocok diaplikasikan di Laut Halmahera pada teluk dangkal dan sempit yaitu *Threshold 10%*, pada teluk dalam dan lebar yaitu *Threshold 50%*, serta pada perairan dekat pulau pulau kecil yaitu *Threshold 10%* dan *Threshold 20%*. Secara umum, *Non-Brown* waveform lebih banyak ditemukan di perairan teluk dangkal dan sempit (rata-rata=63,49%) dibandingkan dengan teluk dalam dan lebar (rata-rata=11,51%) dan perairan pulau-pulau kecil (rata-rata=9,57%). Namun demikian, tingkat perbaikan data SSH di perairan teluk dangkal dan sempit lebih tinggi dibandingkan dengan teluk dalam dan lebar serta perairan pulau-pulau kecil dan laut dalam. Persentase peningkatan perbaikan data (IMP) tertinggi yaitu 96,71% dengan algoritma *Improved Threshold 10%* pada Jason-2 pass 164.

Kata kunci: altimeter, Jason-2, Jason-3, retracking, waveform

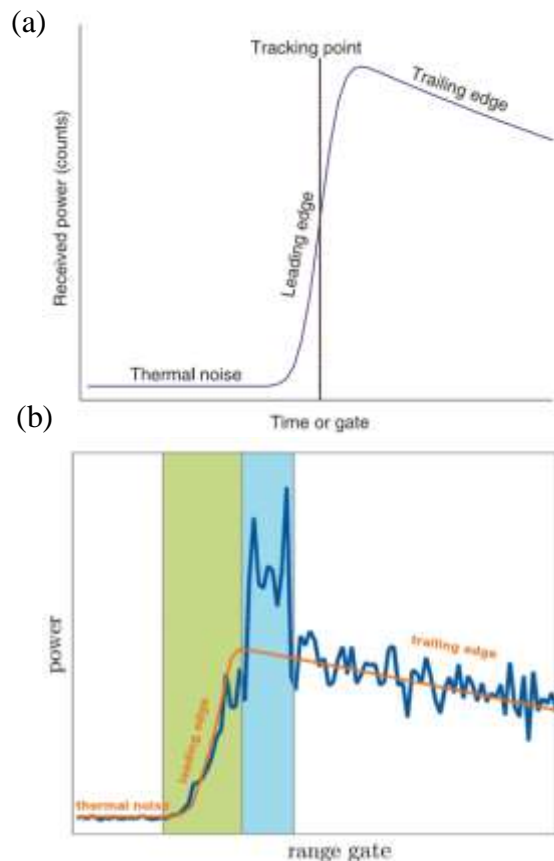
I. PENDAHULUAN

Satelit altimeter memiliki peran penting dalam pengetahuan di bidang kelautan. Satelit altimeter memiliki level akurasi hingga tingkat cm, memiliki area cakupan luas dan tingkat pengulangan yang tinggi (Guo *et al.*, 2010). Data altimeter digunakan untuk pemantauan variasi tinggi muka laut (*sea surface height*). *Sea surface height* (SSH) yang diamati memiliki peranan penting untuk beberapa aplikasi seperti kajian oseanografi (Chelton *et al.*, 2001), pemodelan pasang surut (Savcenko and Bosch, 2008), tren dan variabilitas SSH (Saraceno *et al.*, 2014). Data altimeter pantai berpotensi digunakan untuk mengkaji dinamika pantai dan variabilitas paras laut di perairan pesisir Indonesia (Lumban-Gaol *et al.*, 2018).

Estimasi SSH dari satelit altimeter dipengaruhi oleh bentuk *waveform*. *Waveform* data satelit altimeter umumnya memiliki tiga bagian utama yaitu *thermal noise*, *leading edge*, dan *trailing edge*. *Thermal noise* merupakan bagian dari *waveform* yang menunjukkan waktu pada saat sinyal belum menyentuh permukaan laut sehingga belum terjadi peningkatan *power*. *Leading edge* merupakan bagian *waveform* pada saat pertama kali menyentuh permukaan laut (titik nadir) sehingga terjadi peningkatan *power* sampai titik *power* tertinggi sedangkan *trailing edge* merupakan pantulan energi gelombang di sekeliling titik nadir (Deng and Featherstone, 2006; Gommenginger *et al.*, 2011). Estimasi SSH diperoleh dari pengukuran *range* pada titik tengah *leading edge* (Bao *et al.*, 2008).

Waveform di laut lepas umumnya memiliki bentuk ideal yang pertama kali ditemukan oleh Brown (1997) (Gambar 1a). Titik tengah *leading edge* *Brown waveform* berada pada *gate* yang sudah ditetapkan oleh satelit. Adapun *waveform* yang terbentuk pada perairan pantai dan perairan dangkal merupakan *waveform* kompleks (*Non-Brown waveform*) karena dikontaminasi oleh

topografi pantai dan proses geofisika. Keadaan tersebut menyebabkan posisi *leading edge* pada *Non-Brown waveform* (Gambar 1b) menjadi tidak sesuai dengan bentuk normal seperti terlihat pada model *Brown waveform* sehingga menghasilkan estimasi SSH yang kurang akurat (Yang *et al.*, 2008; Bao *et al.*, 2008).



Gambar 1. Contoh ideal *waveform* (a) *Brown-waveform* yang ditemui pada laut lepas (Deng and Featherstone 2006); (b) *Waveform* yang terganggu daratan (warna biru) (Roscher *et al.* 2017).

Salah satu cara untuk meningkatkan akurasi data SSH di daerah pantai yaitu dengan *retracking waveform* (Deng and Featherstone 2006; Hwang *et al.*, 2006; Bao *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010). *Retracking waveform* merupakan suatu algoritma perhitungan ulang data

altimeter untuk mengoreksi jarak satelit dengan permukaan air berdasarkan *waveform* dari *power* sinyal saat pertama kali menyentuh permukaan air (titik nadir) (Bao *et al.*, 2008). Sandwell and Smith (2005) berhasil meningkatkan akurasi data altimeter ERS-1 di daerah pantai dengan *retracking waveform* hingga 36%. Hwang *et al.* (2006) melakukan *retracking waveform* data altimeter Geosat di perairan Taiwan dengan persentasi peningkatan akurasi tertinggi yaitu 20%. Bao *et al.* (2008) juga berhasil melakukan *retracking waveform* data altimeter ERS-1 di Laut Cina dengan persentase peningkatan hingga 77,9%. Pada tahun 2010, Guo *et al.* melakukan *retracking waveform* data EnviSat di perairan pantai Mediterranean dengan persentase peningkatan hingga 59,8%. Idris and Deng (2012) berhasil meningkatkan akurasi data Jason-1 dan Jason-2 di Australia sekitar *Great Barrier Reef* hingga 86,96% dengan *retracking waveform*. Passaro *et al.* (2014) juga telah mengembangkan metode baru *retracking waveform* yaitu *The Adaptive Leading Edge Subwaveform* (ALES) dan diaplikasikan ke data Envisat, Jason-1 dan Jason-2 di Teluk Trieste dan Teluk Mossel, pantai Afrika Selatan. Idris *et al.* (2017) mengembangkan metode *Coastal Altimetry Waveform Retracking Expert System* (CAWRES) yang mampu meningkatkan akurasi lebih tinggi dibandingkan dengan metode sebelumnya. Roscher *et al.* (2017) juga mengembangkan metode *Spasio-Temporal Altimetry Retracking* (STAR) yang diaplikasikan ke data Jason-2 perekaman di Trieste dan Bangladesh dan mampu memberikan perbaikan akurasi yang lebih baik dari metode ALES dan metode sebelumnya.

Retracking waveform pada daerah pesisir Indonesia masih sangat minim dilakukan sedangkan data SSH perairan Indonesia yang akurat sangat dibutuhkan untuk pemantauan SSH serta dampaknya terhadap pulau-pulau kecil di perairan Indonesia. *Retracking waveform* data

altimeter yang telah dilakukan di Indonesia yaitu *retracking* di pesisir selatan Jawa Tengah dan Jawa Barat (Adrian, 2013), *retracking waveform* Jason-2 di perairan Jawa Timur (Sumerta, 2013), *retracking waveform* Jason-2 di pesisir Pulau Mentawai, Sumatera Barat (Pamungkas, 2014), serta *retracking waveform* di perairan pulau Jawa (Hakim *et al.*, 2015 dan Nababan *et al.*, 2018). Hasil penelitian Nababan *et al.* (2018) menunjukkan bahwa garis pantai yang semakin kompleks menghasilkan *Non-Brown waveform* yang semakin banyak dibandingkan dengan garis pantai kurang kompleks pada perairan dangkal Laut Jawa. *Non-Brown waveform* akan menghasilkan nilai estimasi SSH yang kurang akurat dengan menggunakan algoritma standard *Oceanic*.

Penelitian *retracking waveform* di Indonesia hanya terbatas pada perairan di Pulau Jawa dan Sumatera Barat sehingga *retracking waveform* perlu dilakukan di perairan Indonesia lainnya seperti Laut Halmahera. Laut Halmahera merupakan perairan yang kompleks memiliki kedalaman yang bervariasi dari laut dangkal sampai laut dalam, memiliki banyak teluk dengan keragaman kedalaman yang bervariasi, dilalui oleh arus lintas Indonesia (Arlindo), dan berhubungan langsung dengan Samudera Pasifik. Hal itu menyebabkan Laut Halmahera memiliki kondisi oseanografi yang kompleks. Laut Halmahera juga memiliki pulau-pulau kecil yang rentan akan kenaikan muka laut (*sea level rise*) sehingga SSH di perairan tersebut perlu dipantau. Pemantauan dan kajian SSH tersebut memerlukan data yang akurat terutama di daerah pantai sehingga penelitian mengenai *retracking waveform* data satelit altimeter di daerah ini perlu dilakukan. *Retracking waveform* pada penelitian ini dilakukan pada data satelit Jason-2 dan Jason 3 yang melewati Laut Halmahera seperti daerah teluk dan perairan yang berada di dekat pulau-pulau kecil. Tujuan penelitian ini adalah melakukan *retracking waveform* dan

menganalisis hasil *retracking waveform* satelit altimeter Jason-2 dan Jason-3 yang melewati teluk dangkal, teluk dalam, perairan dekat pulau-pulau kecil, dan laut dalam di Laut Halmahera.

II. METODE PENELITIAN

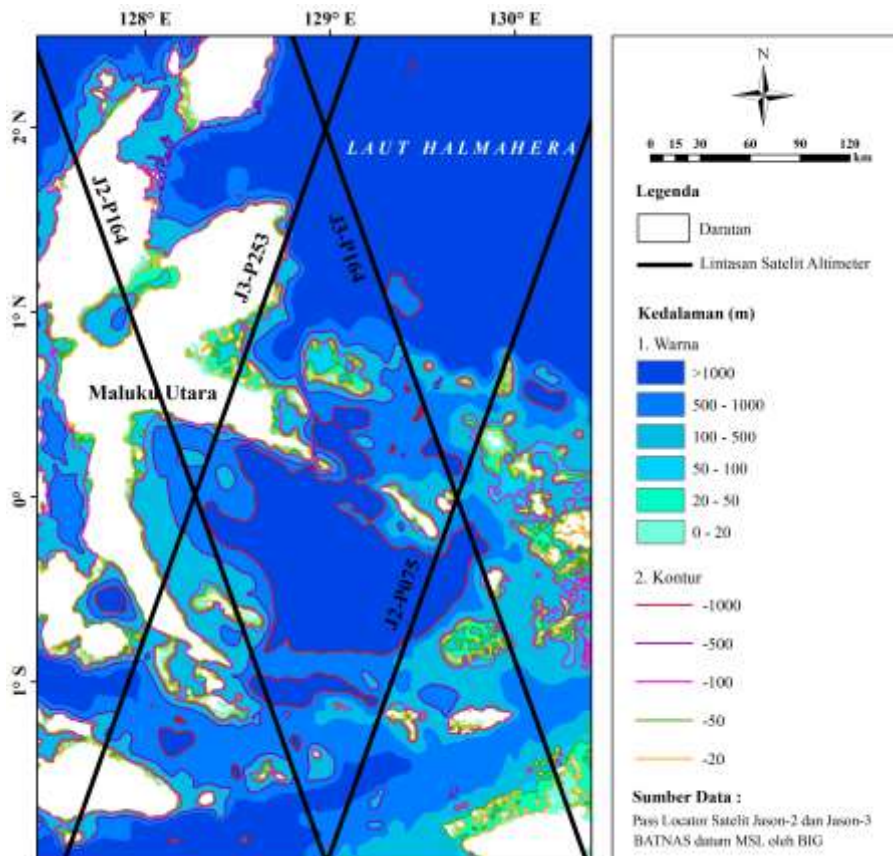
2.1. Lokasi dan Data Penelitian

Lokasi pengamatan mencakup Laut Halmahera mulai dari 127°24'59,38" BT hingga 130°24'40,22" BT dan 2°29'35,84"

LU hingga 1°57'24,89" LS (Gambar 2). Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari data lintasan satelit altimeter, data satelit altimeter Jason-2 (*pass* 75 dan 164) dan Jason-3 (*pass* 253 dan 164) level 2 yaitu SGDR (*Sensor Geophysical Data Record*) tipe D yang melintasi Laut Halmahera pada Januari 2017 (Tabel 1), data *Earth Gravitational Model* 2008 (EGM08) dan data Batimetri Nasional (BATNAS) yang dipublikasi oleh Badan Informasi Geospasial (BIG).

Tabel 1. Koordinat pengamatan *waveform* di Laut Halmahera.

Satelit	Pass	Koordinat Awal		Koordinat Akhir	
		Lintang	Bujur	Lintang	Bujur
Jason-2	164	1°57'39,02"LS	128°58'27,28"BT	2°24'15,00"LU	127°24'55,78"BT
	75	1°57'14,61"LS	128°59'26,48"BT	2°02'58,36"LU	130°24'55,09"BT
Jason-3	164	1°57'32,96"LS	130°23'10,03"BT	2°29'48,66"LU	128°47'38,41"BT
	253	1°57'42,45"LS	127°33'55,41"BT	2°29'47,76"LU	129°09'15,93"BT



Gambar 2. Lokasi Penelitian. Garis warna hitam menandakan *track* dari Satelit Altimeter Jason-2 (J2) dan Jason-3 (J3).

2.3. Retracking waveform

Retracking waveform pada penelitian ini dilakukan pada setiap lintasan yang melewati perairan Halmahera dengan koordinat yang terdapat pada Tabel 1. *Retracking waveform* dilakukan dengan beberapa algoritma (*retracker*) yaitu *Ocean (on-board retracker* yang sudah ada di dalam data SGDR-D), *Ice* (Martin et al., 1983), *Offset Centre of Gravity* (OCO_G) (Wingham et al., 1986), *Threshold* (Davis, 1995 dan 1997), *Improved Threshold* (Hwang et al., 2006). Algoritma *Threshold* dan *Improved Threshold* diaplikasikan dengan beberapa ambang batas yaitu 10%, 20%, dan 50%). *Retracking* dengan beberapa algoritma tersebut menghasilkan *gate* yang memotong posisi tengah *leading edge* sehingga dapat dilakukan koreksi jarak antara satelit dengan permukaan bumi dengan persamaan berikut (Anzenhofer et al., 1999; Guo et al., 2010 dan Yang et al., 2012):

$$d_r = \frac{c \times \Delta G_a}{2} \times (G_r - G_0) \dots \dots \dots (1)$$

$$R_r = R + d_r \dots \dots \dots (2)$$

d_r merupakan koreksi ketinggian satelit dengan permukaan hasil *retracking* (m), c merupakan kecepatan cahaya (299792458 m/s), ΔG_a merupakan interval waktu untuk satu gerbang pengamatan, G_r merupakan nomor gerbang *leading edge point* hasil *retracking*, G_0 merupakan nilai gerbang yang ditentukan pada satelit, R merupakan jarak hasil pengukuran satelit (m), dan R_r merupakan jarak hasil *retracking* (m).

Jarak hasil *retracking* (R_r) dikoreksi untuk memperoleh jarak terkoreksi (R_{corr}). Chelton et al. (2001) menyatakan bahwa komponen koreksi nilai *range* terdiri dari koreksi atmosferik, *sea state bias*, dan koreksi pasang surut. Pada penelitian ini, koreksi yang dilakukan terdiri dari koreksi ionosfer (Δh_{iono}), koreksi troposfer basah (Δh_{wet}), koreksi troposfer kering (Δh_{dry}), koreksi bias kondisi laut (Δh_{ssb}), koreksi

pasang surut (h_{tides}), dan koreksi atmosferik dinamis (h_{am}). Perhitungan untuk menghasilkan jarak terkoreksi dapat dilihat pada persamaan berikut (Andersen and Scharroo, 2011):

$$R_{corr} = R_r - \Delta h_{dry} - \Delta h_{wet} - \Delta h_{iono} - \Delta h_{ssb} - h_{tides} - h_{am} \dots \dots \dots (3)$$

Nilai SSH hasil *retracking* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Yang et al., 2008):

$$SSH = H - R_{corr} \dots \dots \dots (4)$$

2.4. Visualisasi dan Perhitungan Kemampuan Hasil Retracking Waveform

SSH hasil *retracking* dari beberapa metode divisualisasi bersamaan dengan SSH *onboard (Ocean retracker)*, *alt echo type* dan geoid (EGM08). *Alt echo type* akan aktif ('on') pada SSH yang memiliki pola *Non-Brown* sehingga dapat dilihat ke-mampuan setiap *retracker* dalam mem-perbaiki data SSH yang kurang akurat berdasarkan pola geoid. SSH hasil *retracker* yang memiliki pola menyerupai geoid merupakan SSH yang lebih baik sehingga *retracker* tersebut memberikan hasil perhitungan yang lebih tepat.

Kemampuan hasil *retracking* dapat diketahui dengan menghitung peningkatan persentase atau *Improvement Percentage* (IMP) sehingga dapat ditentukan *retracker* terbaik yang memiliki persentase peningkatan akurasi paling tinggi. IMP dari beberapa metode *retracking* dihitung dengan mencari nilai simpangan baku atau *standard deviation* (STD) dari selisih antara SSH dengan geoid (Hwang et al., 2006) menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{Ocean \text{ atau } Retracking} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4)$$

$$IMP = \frac{\sigma_{Ocean} - \sigma_{Retracking}}{\sigma_{Ocean}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

σ_{Ocean} merupakan SD dari selisih antara SSH hasil perhitungan metode *ocean retracking* dengan geoid (EGM08) dan $\sigma_{Retracking}$ merupakan SD dari selisih antara SSH hasil *retracking* dengan geoid. Selain IMP, kemampuan *retracking waveform* juga ditunjukkan oleh *success rate* (SR). SR merupakan persentase jumlah *waveform* yang dapat dihitung ulang (*retracking*) oleh suatu algoritma dari jumlah total *waveform*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *retracking waveform* menunjukkan bahwa setiap *retracker* menghasilkan performa yang berbeda-beda terhadap perbaikan data pada setiap lintasan Jason-2 dan Jason-3 yang melewati Laut Halmahera. Hal itu ditunjukkan oleh perbedaan hasil estimasi SSH dan IMP dari setiap *retracker*. Guo *et al.* (2010) dan Yang *et al.* (2008) mengungkapkan bahwa adanya perbedaan hasil *retracking waveform* dikarenakan setiap *retracker* memiliki kelebihan dan kekurangan berdasarkan kondisi perairan. Hasil *retracking waveform* di daerah teluk berbeda dengan di perairan dekat pulau-pulau kecil dan laut dalam.

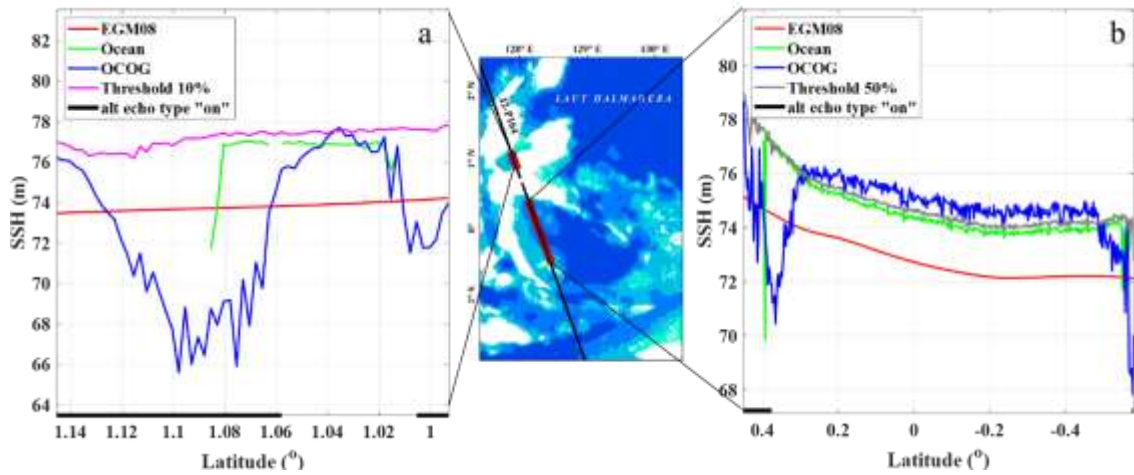
3.1. *Retracking Waveform* di Perairan Teluk

Hasil *retracking waveform* satelit Jason-2 dan Jason-3 perairan teluk di Laut Halmahera menunjukkan adanya perbaikan estimasi nilai SSH yang signifikan. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa *retracking waveform* memberikan perbaikan data SSH ditunjukkan dengan pola SSH hasil *retracking* yang lebih mengikuti pola geoid dibandingkan dengan SSH hasil perhitungan *onboard* (*ocean*). *Retracking waveform* juga

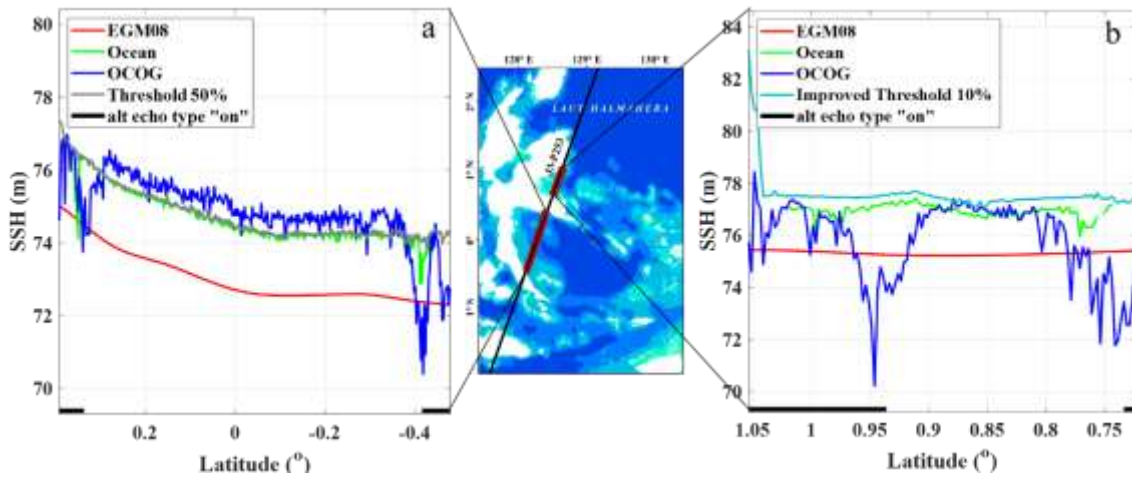
memberikan estimasi SSH pada kekosongan data yang tidak dapat diestimasi oleh *ocean retracker* (garis berwarna hijau). SSH hasil *retracking waveform* menggunakan algoritma *Threshold* 10% di Teluk Kao (Gambar 3a) menunjukkan pola yang mengikuti pola geoid meskipun nilainya lebih tinggi dibandingkan nilai estimasi *ocean* (*over estimated*).

Retracking waveform menggunakan *Improved Threshold* 10% di Teluk Buli (Gambar 4a) juga memperbaiki SSH dan mengestimasi SSH pada beberapa data *ocean* yang kosong dan memiliki pola SSH yang mirip dengan geoid meskipun pada 1,041 LU hingga 1,054 LU, estimasi yang dihasilkan sangat tinggi. Hasil *retracking waveform* menggunakan algoritma *Threshold* 50% di Teluk Weda (Gambar 3b dan Gambar 4a) memiliki pola SSH yang mirip dengan geoid dan nilai SSH yang tidak *over estimated* dari algoritma *ocean*. Adapun SSH hasil *retracking waveform* menggunakan algoritma OCOG di Teluk Kao, Teluk Buli dan Teluk Weda memiliki pola yang sangat tidak beraturan dan tidak mengikuti pola geoid terutama di daerah *alt echo type 'on'*.

Estimasi SSH oleh *ocean retracker* umumnya akurat hanya sampai 10 km dari daratan tergantung kondisi geografi (Wang *et al.* 2017). Namun, *retracking waveform* pada daerah teluk di Laut Halmahera mampu menghasilkan data yang akurat lebih dekat lagi ke arah daratan. Hasil *retracking* pada Teluk Weda memperbaiki estimasi SSH hingga 0,023° atau sekitar 2,6 km dari daratan. Hal ini sesuai dengan hasil *retracking waveform* di sekitar perairan teluk Pulau Tsushima, Jepang oleh Wang *et al.* (2017) yang mampu menghasilkan estimasi data SSH yang akurat hingga 3 km dari daratan.



Gambar 3. SSH hasil *retracking waveform* satelit Jason-2 *pass* 164 di daerah Teluk. (a) Teluk Kao, (b) Teluk Weda.



Gambar 4. SSH hasil *retracking waveform* satelit Jason-3 *pass* 253 di daerah Teluk. (a) Teluk Weda, (b) Teluk Buli.

Tabel 2. Performa hasil *retracking waveform* Jason-2 *pass* 164 dan Jason-3 *pass* 253 dengan beberapa algoritma (*retracker*) di daerah teluk.

Satelit	Pass	Region	Retracker	Peforma	
				IMP (%)	SR (%)
Jason-2	164	Teluk Kao	OCOg	-10,75	100
			Threshold 10%	96,23	100
			Threshold 20%	93,73	100
			Threshold 50%	64,72	100
			Improved Threshold 10%	96,71	100
			Improved Threshold 20%	94,86	100
			Improved Threshold 50%	64,72	100
			Ice	83,78	100
			Ocean	-	48,4

Satelit	Pass	Region	Retracker	Peforma			
				IMP (%)	SR (%)		
Jason-3	253	Teluk Weda	OCOg	-192,16	100		
			Threshold 10%	47,61	100		
			Threshold 20%	46,86	100		
			Threshold 50%	49,05	100		
			Improved Threshold 10%	46,25	100		
			Improved Threshold 20%	42,92	100		
			Improved Threshold 50%	40,22	100		
			Ice	46,25	100		
			Ocean	-	95,41		
			253	Teluk Buli	OCOg	-488,9	100
					Threshold 10%	56,11	100
					Threshold 20%	45,58	100
					Threshold 50%	32,26	100
					Improved Threshold 10%	50,83	100
	Improved Threshold 20%	37,03			100		
	Improved Threshold 50%	19,88			100		
	Ice	42,35			100		
	Ocean	-			82,71		
	253	Teluk Weda			OCOg	-200,57	100
					Threshold 10%	52,91	100
					Threshold 20%	56,12	100
					Threshold 50%	60,97	100
					Improved Threshold 10%	51,84	100
			Improved Threshold 20%	57,59	100		
			Improved Threshold 50%	57,55	100		
			Ice	59,98	100		
			Ocean	-	91,4		

Hasil perhitungan IMP di perairan teluk Laut Halmahera (Tabel 2) menunjukkan bahwa setiap *retracker* memberikan performa perbaikan data SSH yang berbeda-beda. Hampir semua *retracker* mampu meningkatkan akurasi data SSH di Teluk Kao dengan IMP diatas 80% dengan *retracker* terbaik yaitu *Threshold 10%* dan *Improved Threshold 10%*. Kedua *retracker* ini mampu memperbaiki data SSH di Teluk Kao dengan perbedaan persentase hanya 0,49% sehingga performa kedua *retracker* ini tidak memiliki perbedaan yang signifikan. *Threshold 10%* juga merupakan *retracker* terbaik di Teluk Buli meskipun persentase peningkatannya dibawah 60%. Hasil *retracking* di Teluk Buli memperlihatkan

perbedaan performa yang signifikan pada setiap *retracker* ditandai dengan nilai IMP yang sangat beragam dibandingkan dua teluk lainnya. Sebaliknya, hasil *retracking* di Teluk Weda memperlihatkan IMP yang hampir sama pada setiap *retracker* meskipun *Threshold 50%* memberikan perbaikan terbaik di Teluk Weda baik pada Jason-3 pada Jason-2 *pass* 164 maupun Jason-3 *pass* 253. *Retracker-retracker* terbaik tersebut memiliki kemiripan dengan hasil *retracking* yang dilakukan oleh Nababan *et al.* (2018) di selatan Jawa dan Laut Jawa.

Persentase perbaikan tertinggi di daerah teluk Laut Halmahera terdapat pada Teluk Kao (Jason-2 *pass* 164) yaitu 96,71% menggunakan algoritma *Improved Threshold*

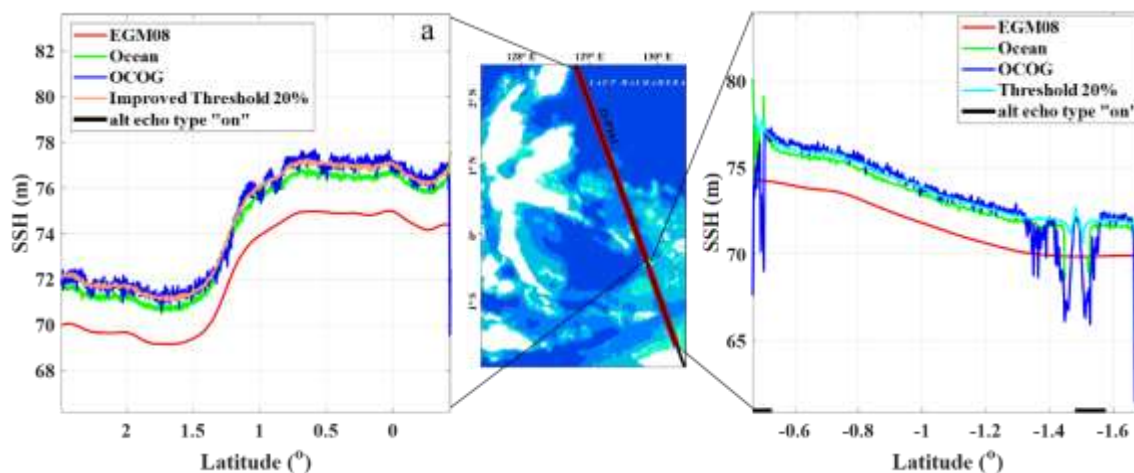
10%. Pada Teluk Kao terdapat banyak data yang tidak mengikuti pola *Brown* sehingga banyak data yang tidak dapat diestimasi oleh *ocean*. Persentase SR pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa algoritma *ocean* hanya mampu mengestimasi 48,4% dari total data *waveform* di Teluk Kao. Adapun persentase perbaikan terendah diperoleh dari estimasi menggunakan OCOG. OCOG tidak menghasilkan perbaikan data dan bahkan memberikan penurunan akurasi (IMP bernilai negatif). Hal tersebut dikarenakan algoritma OCOG melakukan *retracking* hanya dengan pendekatan statistik berdasarkan perhitungan antara lebar *gate* dengan lebar amplitudonya (Guo et al., 2010).

Hasil analisis *retracking waveform* di perairan teluk menunjukkan perbedaan perbaikan data antara teluk yang lebih dangkal (kedalaman kurang dari 500 m) dan teluk dalam (kedalaman lebih dari 500 m). Performa *retracking waveform* pada teluk yang lebih dangkal dan sempit (Teluk Kao) lebih baik dibandingkan pada teluk yang lebih dalam dan lebar (Teluk Weda). Hal ini disebabkan persentase *Non-Brown waveform* di teluk dangkal dan sempit lebih tinggi dibandingkan teluk dalam dan lebar serta perairan dekat pulau-pulau kecil. Persentase rata-rata *Non-Brown waveform* di teluk dangkal dan sempit adalah 63,49% sedangkan

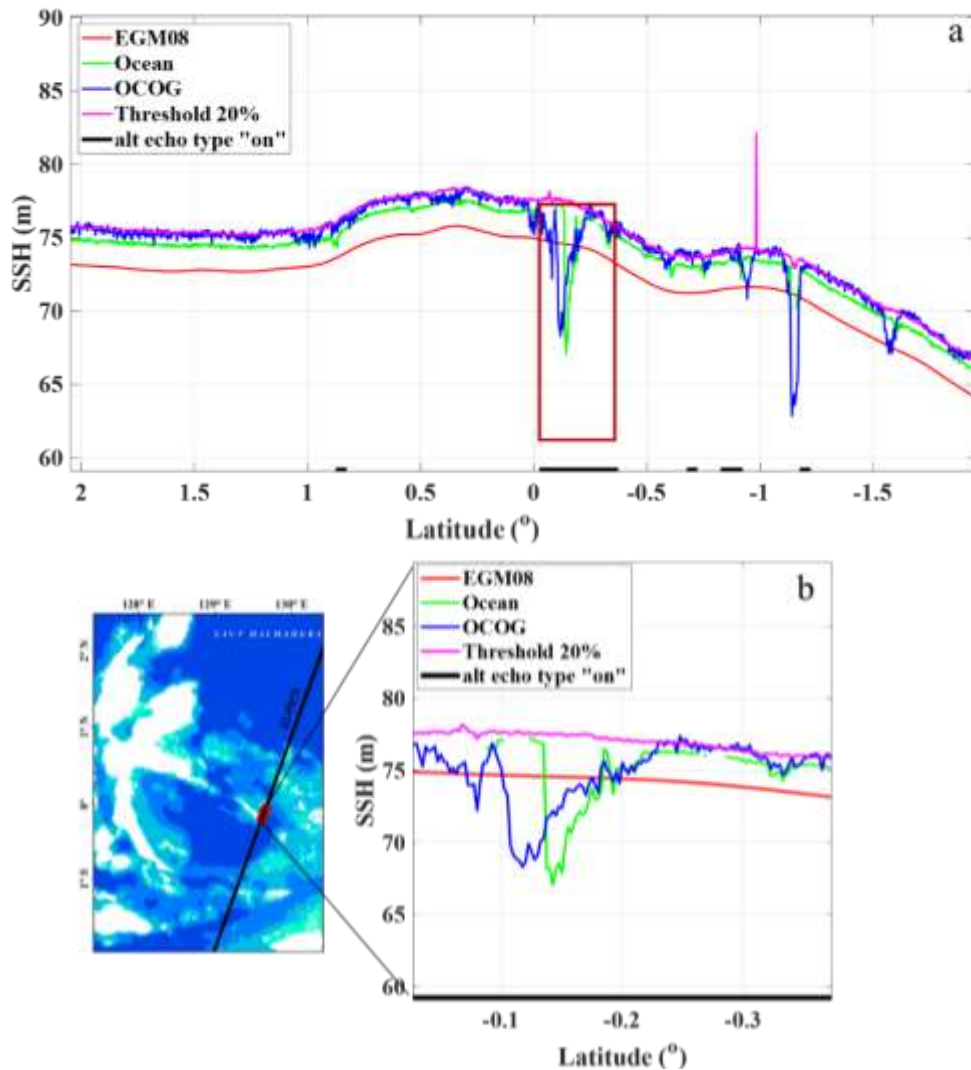
di teluk dalam dan lebar adalah 11,51%. Selain itu, rata-rata IMP yang dihasilkan pada teluk dangkal dan sempit juga lebih tinggi mencapai 84,96% meskipun pada teluk dangkal yang terdapat banyak pulau-pulau kecil (Teluk Buli) memiliki hasil yang hampir sama dengan teluk dalam. IMP rata-rata pada teluk dangkal, sempit, dan terdapat banyak pulau-pulau kecil yaitu 40,58% dan IMP rata-rata pada teluk dalam dan lebar yaitu 51,03%. Adapun *retracker* yang paling sesuai pada teluk yang lebih dangkal dan sempit yaitu *Threshold* 10% sedangkan *retracker* yang cocok diaplikasikan pada teluk dalam dan lebar yaitu *Threshold* 50%.

3.2. *Retracking Waveform* di Perairan Pulau-Pulau Kecil dan Laut Dalam

Hasil *retracking waveform* pada satelit Jason-3 *pass* 164 dan Jason-2 *pass* 75 yang melewati pulau-pulau kecil dan laut dalam memberikan perbaikan terhadap data SSH. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa *retracking waveform* menghasilkan pola SSH yang menyerupai geoid kecuali OCOG. Untuk melihat SSH hasil *retracking* lebih jelas, dilakukan deliniasi pada lintasan Jason-2 *pass* 75 yang terdapat *alt echo type* "on" yaitu pada 0,03018 LS hingga 0,3729 LS yang terletak diantara dua pulau kecil (Gambar 6b).



Gambar 5. SSH hasil *retracking waveform* satelit Jason-3 *pass* 164 di Laut Halmahera. (a) Bagian atas Pulau Gag, (b) Bagian bawah Pulau Gag.



Gambar 6. SSH hasil *retracking waveform* satelit Jason-2 *pass* 075 di Laut Halmahera. (a) *full track*, (b) bagian *alt echo type* “on”.

Gambar 6b memperlihatkan *noise* estimasi SSH hasil perhitungan *on-board* yang sangat jelas ditandai dengan pola garis lembah yang sangat tajam (hijau) bahkan melewati geoid. Kesalahan pengukuran data SSH tersebut terlihat dapat diperbaiki dengan *retracker Threshold 20%* namun tidak untuk OCOG. OCOG tidak mem-berikan akurasi yang lebih baik dan hasil SSH-nya tidak mengikuti pola geoid, namun metode ini setidaknya mampu memberikan estimasi SSH pada bagian yang tidak memiliki data SSH *ocean*. Secara umum, SSH hasil *retracker* yang diaplikasikan ke data altimeter ini menghasilkan ketinggian yang *over estimated*

ditandai dengan pola garis SSH hasil *retracking* berada di atas pola garis SSH *ocean*.

Persentase perbaikan estimasi data SSH Jason-3 *pass* 164 menunjukkan performa yang berbeda pada bagian atas Pulau Gag dengan bagian bawah Pulau Gag (Tabel 3). Tabel 3 memperlihatkan bahwa *retracking waveform* pada bagian atas Pulau Gag hanya mampu memperbaiki data SSH hingga 22,48% sedangkan pada bagian bawah Pulau Gag mencapai 66,9%. Selain itu, persentase SR juga mem-perlihatkan bahwa *Ocean retracker* sudah mampu mengestimasi 99,91% dari total *waveform* pada bagian atas

Pulau Gag sehingga terdapat lebih sedikit data yang kosong dibandingkan bagian bawah Pulau Gag. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat perbaikan data SSH dengan *retracking waveform* lebih tinggi di perairan yang lebih dangkal dan terdapat banyak pulau-pulau kecil dibandingkan dengan laut dalam. Hasil *retracking waveform* Jason-2 *pass* 251 yang melewati pulau-pulau kecil di Great Barrier Reef Australia oleh Idris and Deng (2012) juga menghasilkan IMP yang tinggi yaitu 80,23%. IMP tersebut lebih tinggi bila dibandingkan dengan IMP pada Jason-2 lintasan 099 yang tidak melewati pulau-pulau kecil.

Hasil *retracking waveform* menunjukkan bahwa terdapat perbedaan *retracker* terbaik pada Jason-3 *pass* 164 dan Jason-2 *pass* 075. IMP tertinggi pada Jason-3 *pass* 164 di perairan bagian atas pulau Gag yaitu *Improved Threshold* 20% sedangkan pada perairan bagian bawah pulau Gag yaitu *Threshold* 20%. Adapun *retracker* terbaik di sepanjang lintasan Jason-2 *pass* yaitu *Threshold* 10%. Sebaliknya, *retracker* yang

memiliki IMP terendah yaitu OCOG yang memiliki nilai IMP negatif baik pada lintasan Jason-3 *pass* 164 maupun Jason-2 *pass* 075. Selain itu, *Improved Threshold* 50% juga tidak mampu memperbaiki data SSH pada Jason-3 *pass* 164 bagian atas Pulau Gag dan Jason-2 *pass* 075.

Performa dari delapan *retracker* yang diaplikasikan di perairan dekat pulau-pulau kecil baik perairan dalam maupun perairan dangkal tidak memberikan perbaikan yang sama. Namun, terdapat empat *retracker* yang konsisten mem-berikan perbaikan yang baik untuk perairan dekat pulau-pulau kecil. *Retracker* tersebut yaitu *Threshold* 10 %, *Threshold* 20%, *Improved Threshold* 10 %, dan *Improved Threshold* 20 %. Persentase perbaikan rata-rata perairan dekat pulau-pulau kecil yaitu 35,62% dengan persentase rata-rata *Non-Brown waveform* sebesar 9,57%. Adapun *retracker* yang paling sesuai diaplikasikan pada perairan dekat pulau-pulau kecil yaitu *Threshold* 20% untuk Jason-2 dan *Threshold* 10 % untuk Jason-3.

Tabel 3. Performa hasil *retracking waveform* Jason-3 *pass* 164 dan Jason-2 *pass* 075 dengan beberapa algoritma (*retracker*) di perairan pulau-pulau kecil dan laut dalam.

Satelit	Pass	Region	Retracker	Peforma	
				IMP (%)	SR (%)
Jason-3	164	Lintasan bagian atas Pulau Gag	OCOG	-188,91	100
			Threshold 10%	21,52	100
			Threshold 20%	22,00	100
			Threshold 50%	4,00	100
			Improved Threshold 10%	20,57	100
			Improved Threshold 20%	22,48	100
			Improved Threshold 50%	-3,40	100
			Ice Ocean	18,43	100
		Lintasan bagian bawah Pulau Gag	OCOG	-202,96	100
			Threshold 10%	62,90	100
			Threshold 20%	66,90	100
			Threshold 50%	-34,37	100
			Improved Threshold 10%	55,62	100
			Improved Threshold 20%	61,44	100
	Improved Threshold 50%	3,20	100		

Satelit	Pass	Region	Retracker	Peforma	
				IMP (%)	SR (%)
Jason-2	75	Sepanjang Lintasan di Laut Halmahera	Ice	37,77	100
			Ocean	-	92,46
			OCOG	-83,63	100
			Threshold 10%	66,19	100
			Threshold 20%	59,69	100
			Threshold 50%	4,13	100
			Improved Threshold 10%	64,94	100
			Improved Threshold 20%	62,52	100
			Improved Threshold 50%	-2,35	100
			Ice	25,93	100
			Ocean	-	97

IV. KESIMPULAN

Retracking waveform data satelit altimeter di Laut Halmahera dengan *Threshold 10%*, *Threshold 20%*, *Threshold 50%*, *Improved Threshold 10%*, *Improved threshold 20%*, *Improved Threshold 50%*, dan *Ice* memberikan perbaikan data SSH mulai dari 3.2% sampai 96.71% sedangkan *retracker* OCOG tidak mampu memberikan perbaikan. Tidak ditemukan adanya satu *retracker* yang terbaik di Laut Halmahera baik di perairan teluk maupun perairan pulau-pulau kecil dan laut dalam. *Retracker* yang paling banyak muncul sebagai *retracker* terbaik pada satelit Jason-2 dan Jason-3 di Laut Halmahera adalah *Threshold 10%*. Nilai IMP tertinggi pada penelitian ini sebesar 96,71% diperoleh dengan menggunakan algoritma *Improved Threshold 10%* pada Jason-2 *pass* 164 yang melewati Teluk Kao.

Retracking waveform pada teluk dangkal dan sempit memberikan performa yang lebih baik dibandingkan teluk dalam dan perairan dekat pulau-pulau kecil. Persentase perbaikan rata-rata pada teluk dangkal dan sempit yaitu 84,96%, pada teluk dalam dan lebar yaitu 51,03%, dan pada perairan dalam dekat pulau-pulau kecil yaitu 35,62%. Namun, *Non-Brown wave-form* lebih banyak ditemukan di perairan teluk dangkal dan sempit (rata-rata=63,49%) dibandingkan dengan teluk dalam dan lebar (rata-

rata=11,51%) dan perairan pulau-pulau kecil (rata-rata=9,57%). *Retracker* yang paling baik diaplikasikan pada teluk yang lebih dangkal dan sempit di Laut Halmahera yaitu *Threshold 10%* sedangkan pada teluk dalam dan lebar yaitu *Threshold 50%*. Adapun *retracker* yang cocok diaplikasikan pada perairan dekat pulau-pulau kecil di Laut Halmahera yaitu *Threshold 10 %* dan *Threshold 20%*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset dan Teknologi Pendidikan Tinggi melalui Program Penelitian Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) tahun anggaran 2019 dengan nomor kontrak No. 3/E1/KP.PTNBH/2019 tanggal 29 Maret 2019 dan Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian PMDSU dengan nomor kontrak No. 4252/IT3.L1/ PN/2019 tanggal 4 April 2019 (PI: Dr. Ir. Bisman Nababan, M.Sc.). Penulis mengucapkan terima kasih AVISO dan European Space Agency yang telah menyediakan data satelit altimetri untuk penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada *anonymous reviewers* yang telah memberikan masukan dan komentar yang konstruktif untuk me-ningkatkan mutu 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. 49hlm.
- 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. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste, (ed.). Coastal Altimetry.* Berlin (DE): Springer. 103-145 pp.
- Anzenhofer M., C.K. Shum, and M. Rentsh. 1999. Coastal altimetry and applications. Columbus (US): The Ohio State University. 36p.
- Bao L., Y. Lu, and Y. Wang. 2008. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Progress in Natural Science.* 19:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.06.017>
- Brown G.S. 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 25: 67-74. <https://doi.org/10.1109/TAP.1977.1141536>
- Chelton D.B., J.C. Ries, B.J. Haines, L. Fu, and P. Callahan. 2001. Satellite altimetry. *In: Fu L. and A. Cazenave (ed.). Satellite Altimetry and earth sciences: A Handbook of Techniques and Applications.* San Diego (US): Academic Press. 1-132 pp.
- Davis C.H. 1995. Growth of the Greenland ice sheet: a performance assessment of altimeter retracking algorithms. *IEEE Trans. Geosci.* 33(5):1108-1116. <https://doi.org/10.1109/36.469474>
- Davis C.H. 1997. A robust threshold retracking algorithm for extracting ice-sheet surface elevation from satellite radar altimeters. *IEEE Trans. Geosci.* 35(4):974-979. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516800>
- Deng X. and W.E. Featherstone. 2006. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: application to ERS-2 around Australia. *J. of Geophysical Research.* 111:1-16. <https://doi.org/10.1029/2005JC003039>
- 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. Kostianoy, P. Cipollini and J. Benveniste . Coastal altimetry.* Berlin (DE): Springer. 61-101 pp.
- 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. *Sci. China Earth Sci.* 53(4):610- 616. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0171-3>
- Hakim M.R., B. Nababan, dan J.P. Panjaitan. 2015. Peningkatan akurasi estimasi tinggi paras laut melalui analisis retracking waveform satelit jason-2 di laut jawa. *J. Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis.* 7(2):771-790. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v7i2.11254>
- Hwang C., J.Y. Guo, X. Deng, H.Y. Hsu, and Y.T. Liu. 2006. Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data. *J. Geod.* 80:204-216. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0052-x>
- Idris N.H and X. Deng. 2012. The retracking technique on multi-peak and quasi-specular waveforms for Jason-1 and Jason-2 missions near the coast. 35(S1):217-237.

- <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718679>
- Idris N.H., X. Deng, A.M.M. Din, and N.W. Idris. 2017. CAWRES: a waveform retracking fuzzy expert system for optimizing coastal sea levels from Jason-1 and Jason-2 satellite altimetry data. *Remote Sensing*, 9(603):1-22. <https://doi.org/10.3390/rs9060603>
- Lee H., C.K. Shum, W. Emery, S. Calmant, S. 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. <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.488982>
- Lumban-Gaol, J., D. Adrian, S. Vignudelli, R. R. Leben, I.W. Nurjaya, T. Osawa, P. Manurung, P. and R.E. Arhatin. 2018. An assessment of a coastal altimetry data product in the Indonesian Waters. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ.*, 176(2018) 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012034>
- Martin T.V., H.J. Zwally, A.C. Brenner, and A. Bindshadler. Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms. *J. Geophys. Res.* 88(C3):1608-1616. <https://doi.org/10.1029/JC088iC03p01608>
- Nababan, B., M.R. Hakim, and J.P. Panjaitan. 2018. Waveform Identification and Retracking Analyses of Jason-2 Altimeter Satellite Data for Improving Sea Surface Height Estimation in Southern Java Waters and Java Sea, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.*, 149 (2018) 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/149/1/012057>
- Nababan B., R. Hakim, D. Adrian, dan J. Lumban-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. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v6i2.9021>
- Pamungkas M. 2014. Waveform retracking satelit Jason 2 tahun 2012 di pesisir Pulau Mentawai, Sumatera Barat. Skripsi. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan. Institut Pertanian Bogor. 48hlm.
- Passaro M., P. Cipollini, S. Vignudelli, G.D. Qurtly, and H.M. Snaith. 2014. ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. *Remote Sens. Environ.*, 145:173-189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008>
- Roscher R., B. Uebbing, and J. Kusche. 2017. STAR: Spatio-temporal altimeter waveform retracking using sparse representation and conditional random fields. *Remote Sens. Environ.*, 201:148-164. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.024>
- Sanwell D.T. and W.H.F. Smith. 2005. Retracking ERS-1 altimeter waveforms for optimal gravity field recovery. *Geophys. J. Int.*, 163:79-89.
- Saraceno M., C.G. Simionato, and L.A. Ruiz-Etcheverry. 2014. Sea surface height trend and variability at seasonal and interannual time scales in the Southern South American continental shelf between 27°S and 40°S. *Cont. Shelf Res.*, 91:82-94. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.09.002>
- Sumerta K.S. 2013. Waveform retracking satelit Jason 2 di Perairan Jawa Timur. Skripsi. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan. Institut Pertanian Bogor. 104hlm.
- Wang X., K. Ichikawa. 2017. Coastal waveform retracking for Jason-2 Altimeter Data Based on Along-Track Echograms around the Tsushima

- Island in Japan. *Remote Sensing*, 9(762):1-13.
<https://doi.org/10.3390/rs9070762>
- Wingham D.J., C.G. Rapley, and H. Griffiths. 1986. New technique in satellite altimeter tracking systems. *IGARSS'86 Symposium Diges.*, 1:185-190.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.017>

Received : 23 August 2019

Reviewed : 10 September 2019

Accepted : 05 Desember 2019

