



Utilization of Tide Observation and Satellite Altimetry Data for Detecting Land Vertical Movement

Maritsa Faridatunnisa, Leni Sophia Heliani, Dwi Lestari

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, INDONESIA

Article History:

Received 28 November 2018

Received in revised form 1 February 2019

Accepted 3 February 2019

Available online 3 February 2019

Keywords:

Pasang surut, satelit altimetri, pergerakan vertikal, SSH, SLA, SLRS

Corresponding Author:

Maritsa Faridatunnisa

Email: maritsa.faridatunnisa@ugm.ac.id

ABSTRACT. Indonesia is one of the country that often experiences earthquakes and volcanic eruptions because of its position on the meeting point of three active tectonic plates, namely the Eurasian, Indo-Australian and Pacific plates. This causes movement or deformation both horizontally and / or vertically. Current movement monitoring is done using GNSS technology. However, the distribution of monitoring points are not spread evenly and the results of GNSS observation have weaknesses in their vertical components. An alternative method for monitoring movement especially in vertical components is using combination of tide observation and satellite altimetry data. The measurement concept of satellite altimetry produces absolute sea level values and it's not affected by plate movements, besides tidal measurements which sensors are installed on the ground so that the sea level values are affected by land uplift or subsidence at that location. This study used main data, namely long-period tidal observation data and GDR (Geophysical Data Record) satellite altimetry. GNSS observation data is needed as a control of vertical movement. The differences in spatial and temporal resolution of tidal observation and satellite altimetry are overcome by two methods, namely the daily and monthly methods. Each of these methods will produce an annual SLR value (Sea Level Rise) from tidal data and satellite altimetry calculated using linear regression. The difference between the tidal and satellite altimetry data trends is compared with the vertical movement value from GNSS data. The results of the study indicate that the determination of vertical movement can be done using tidal observation and satellite altimetry data, especially using the monthly method. The trend of vertical movements of tidal observation and satellite altimetry data shows the same pattern with land vertical movement of GNSS data even though the value is different. Therefore, the method to determine vertical movement from hydrological data can be used as an initial observation on a coastal area regarding the phenomenon of vertical movements that occur in the area.

© Author(s) 2018. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Posisi geografis Indonesia yang berada pada daerah patahan dan sesar aktif menyebabkan Indonesia sering mengalami fenomena gempa bumi dan gunung meletus atau fenomena alam lainnya yang menimbulkan deformasi. Hal tersebut memberikan dampak positif maupun negatif bagi Indonesia. Dampak positifnya, beragamnya topografi wilayah Indonesia dan letak mineral yang dekat dengan permukaan tanah. Namun, dampak negatif dari aktifnya sesar maupun lempeng juga tak dapat dihindari. Terjadinya bencana alam yang menimbulkan kerugian

baik materiil berupa kerusakan infrastruktur juga besar terjadi.

Dampak negatif tersebut dapat dihindari dengan kegiatan mitigasi bencana yang tepat. Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana, yang dimaksud dengan mitigasi adalah serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana. Keilmuan geodesi dapat turut serta dalam kegiatan mitigasi bencana, khususnya pada upaya penyadaran risiko bencana dan

peningkatan menghadapi bencana, sehingga kerugian yang ditimbulkan akibat bencana dapat dikurangi atau dihindari.

Mitigasi terhadap pergerakan lempeng dapat dilakukan dengan berbagai teknologi survey, salah satunya dengan teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Metode ini dapat mengamati aktivitas lempeng di wilayah stasiun pemantauan dengan memasang *receiver* GNSS di stasiun pemantauan tersebut. *Receiver* GNSS ini harus dipasang dengan persebaran yang merata dan mengakuisi data secara kontinyu. Namun, persebaran stasiun *monitoring* pergerakan lempeng tidak merata serta membutuhkan biaya dan perawatan yang cukup besar. Selain itu, teknologi GNSS memiliki kelemahan pada komponen posisi vertikalnya (Abidin, 1995).

Salah satu solusi untuk mengidentifikasi pergerakan lempeng khususnya pada komponen vertikalnya adalah dengan kombinasi data satelit altimetri dan pasang surut. Pada penelitian ini dibahas mengenai pemanfaatan data satelit altimetri dan pasang surut untuk mendeteksi pergerakan vertikal.

2. Data dan Metodologi

Pada penelitian ini digunakan data periode panjang pengamatan pasang surut dan data *Geophysical Data Record* (GDR) satelit altimetri untuk mendeteksi adanya pergerakan vertikal pada suatu titik pengamatan. Selain itu, diperlukan data pengamatan GNSS di titik pengamatan yang sama yang akan digunakan sebagai pembanding.

2.1. Data

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah data pengamatan stasiun pasang surut periode panjang dan GDR satelit altimetri periode panjang. Data Model Geopotensial Global (MGG) EGM96 dan model pasang surut global FES2012 juga diperlukan untuk penanganan data satelit altimetri. Data pengamatan GNSS di stasiun pasang surut yang sama juga dibutuhkan sebagai kontrol data posisi vertikal. Pada penelitian ini menggunakan data dari lokasi penelitian di pulau Jawa, yaitu stasiun pasut Semarang dan Prigi.

Perangkat lunak yang digunakan adalah Matlab 2013b, BRAT, GAMIT/GLOBK, Surfer10, Ferret for Linux, QGIS dan Google Earth.

2.2. Metodologi

Penentuan pergerakan vertikal menggunakan kombinasi data satelit altimetri dan pengamatan pasang surut didasarkan pada prinsip akuisisi data ketinggian muka air laut kedua data tersebut yang berbeda. Satelit altimetri melakukan pengukuran SSH (*Sea Surface Height*) yang mengandung informasi lokasi satelit terhadap elipsoid referensi dan tinggi satelit di atas permukaan laut. Perbedaan keduanya menghasilkan nilai SSH relatif terhadap elipsoid referensi sehingga nilai SSH dari data satelit altimetri bersifat absolut (Garcia dkk., 2007) dan tidak dipengaruhi oleh pergerakan lempeng.

Di sisi lain, pengamatan pasang surut dilakukan dengan menggunakan sensor yang dipasang pada stasiun pasang

surut yang berada di tanah atau lempeng bumi. Oleh karena itu, pengukuran tinggi muka air lautnya mengacu terhadap titik referensi yang juga berada di atas lempeng sehingga nilai ketinggian muka air laut yang diperoleh terpengaruh oleh pergerakan vertikal tanah yang tidak berhubungan dengan variasi tinggi muka air laut (Trisirisatayawong dkk., 2011).

Kedua prinsip pengukuran yang berbeda tersebut dapat digunakan untuk pendeteksian pergerakan vertikal. Pada metode ini diasumsikan satelit altimetri dan pasang surut mengukur dan mengamati sinyal lautan yang identik (Trisirisatayawong dkk., 2011). Sinyal tersebut dihapuskan dari nilai tren data pasut dan satelit altimetri sehingga hanya akan tersisa komponen pergerakan vertikal tanah yang tercatat pada data pengamatan pasang surut.

Penanganan data satelit altimetri dan pasang surut harus dilakukan dengan teliti. Hal ini dikarenakan nilai akuisisi kedua data tersebut akan diolah menjadi nilai tren kenaikan tinggi muka air laut yang digunakan untuk mendeteksi adanya pergerakan vertikal yang nilainya kecil.

A. Pengelolaan Data Satelit Altimetri

Data satelit altimetri yang digunakan adalah rekaman data geofisik yang didalamnya berisi informasi observasi mengenai jarak altimeter, tinggi gelombang, tinggi muka air laut dan posisi relatif terhadap konstelasi satelit GPS/GNSS. Masing-masing satelit altimetri memiliki konvensi penamaan data yang mungkin saja berbeda, dengan *repeat cycle* yang juga berbeda-beda.

Tidak semua *track/pass* satelit altimetri digunakan dalam penelitian ini. Hanya dipilih yang paling dekat melintasi posisi pengamatan, minimal satu titik pengamatan diapit oleh satu *ascending track* dan satu *descending track*. Selain itu, tidak digunakan seluruh data sepanjang *track* satelit altimetri. Cukup diambil data sepanjang *track* yang dekat dengan daratan, yang masih dapat merepresentasikan nilai kenaikan tinggi muka air laut pada lokasi pengamatan.

GDR satelit altimetri tersebut kemudian diproses pada suatu perangkat lunak bernama BRAT (*Basic Radar Altimetry Toolbox*) untuk dapat diekstrak nilai SSH. Perangkat lunak ini dapat membaca data satelit altimetri dan menyajikan formula untuk mengekstrak informasi yang dikandung didalam GDR satelit altimetri. Selain nilai SSH, dapat juga diekstrak nilai SLA (*Sea Level Anomaly*), yaitu nilai SSH yang sudah direferensikan terhadap nilai geoid. Pada penelitian ini, geoid yang digunakan adalah model geoid global EGM96 sehingga nilai SLA akan diperoleh dari nilai SSH yang diekstrak dari data GDR kemudian direferensikan dengan hasil ekstrak undulasi geoid EGM96 secara terpisah.

Penanganan data satelit altimetri tidak boleh terpisah dari koreksi geofisik data akuisisi satelit altimetri. Koreksi geofisik biasanya terdiri dari koreksi pasang surut laut (*ocean tide*), pasut pembebanan (*loading tide*), pasut bumi padat (*solid earth tide*), pasut kutub (*pole tide*), dan pasut atmosfer. Koreksi pasut laut tidak digunakan dalam ekstrak nilai SSH satelit altimetri. Hal ini bertujuan untuk menjaga kekonsistenan dengan data pasang surut

(Fenoglio-Marc, dkk., 2012). Selain itu, koreksi pasut laut juga tidak menggunakan koreksi yang disediakan pada perangkat lunak, karena digunakan koreksi pasut laut dari model pasut global FES2012. Model pasut global ini lebih sesuai digunakan di perairan Indonesia, khususnya perairan pulau Jawa (Faridatunnisa, 2015).

Setiap satelit altimetri memiliki formula ekstrak SSH beserta koreksinya yang mungkin saja berbeda. Formula ekstrak SSH untuk satelit altimetri Topex/Poseidon, Jason-1 dan Jason-2 disajikan pada persamaan 1, 2, dan 3 (Rosmorduc, 2009).

$$SSH_{T/P} = (((((((Sat_alt - H_Alt) - Dry_Corr) - Inv_Bar) - H_Eot_FES) - H_Set) - H_Pol) - SSB_Corr_K1) - Iono_Cor) - Wet_H_Rad \quad (1)$$

$$SSH_{J_1} = (((((((altitude - range_ku) - model_dry_topo_corr) - (hf_fluctuations_corr + inv_bar_corr)) - ocean_tide_sol1) - solid_earth_tide) - pole_tide) - sea_state_bias_ku) - iono_corr_alt_ku) - rad_wet_tropo_corr) - pseudo_datation_bias_corr_ku \quad (2)$$

$$SSH_{J_2} = (((((((alt - range_ku) - model_dry_topo_corr) - (hf_fluctuations_corr + inv_bar_corr)) - ocean_tide_sol1) - solid_earth_tide) - pole_tide) - sea_state_bias_ku) - iono_corr_alt_ku) - rad_wet_tropo_corr \quad (3)$$

Dengan :

- Sat_alt, altitude, alt : tinggi satelit altimetri dari elipsoid referensi
- H_alt, range_ku : tinggi satelit altimetri dari permukaan laut
- Dry_Corr, model_dry_topo_corr : koreksi troposfer kering
- Inv_Bar, inv_bar_corr : koreksi *inverse barometer*
- H_Eot_FES, ocean_tide_sol1 : koreksi pasut laut
- H_Set, solid_earth_tide : koreksi pasut bumi padat
- H_Pol, pole_tide : koreksi pasut kutub
- SSB_Corr_K1, sea_state_bias_ku : koreksi *sea state bias*
- Iono_Cor, iono_corr_alt_ku : koreksi ionosfer
- Wet_H_Rad, rad_wet_tropo_corr : koreksi troposfer basah
- pseudo_datation_bias_corr_ku : koreksi bias *pseudo altimeter datation* hanya untuk data satelit Jason-1 versi c atau lebih tinggi

Nilai SSH dari data GDR kemudian dikoreksi dengan nilai koreksi pasut laut dari model global FES2012. Nilai koreksi ini diperoleh dengan mengekstrak nilai komponen pasut utama dari data model pasut global FES2012 menggunakan *Ferret for Linux*. Nilai yang diekstrak disesuaikan dengan posisi nilai SSH dari hasil ekstrak GDR.

Nilai SSH terkoreksi masih mungkin mengandung adanya data *outlier*. Data *outlier* dapat dihilangkan dengan menghilangkan data yang tidak memiliki nilai akuisisi, menghilangkan data pada daratan, dan menghilangkan data lonjakan (Putra, 2013). Sebelum menghilangkan data lonjakan, pemilihan titik normal dan pengelompokan data perlu dilakukan. Titik normal diperlukan karena akuisisi data oleh satelit altimetri tidak persis sama mengulang pada lokasi yang sama, meskipun mengorbit pada *groundtrack* yang sama. Posisi akuisisi biasanya akan bergeser kurang lebih 1 kilometer dari posisi seharusnya. Semua bacaan tinggi muka air laut akan diinterpolasikan terhadap titik normal yang dianggap memiliki nilai posisi yang paling benar (Basith, 2001). Maka dari itu, perlu dilakukan pengelompokan data untuk data tinggi muka air laut yang berada pada radius 1 kilometer dari titik normal tersebut.

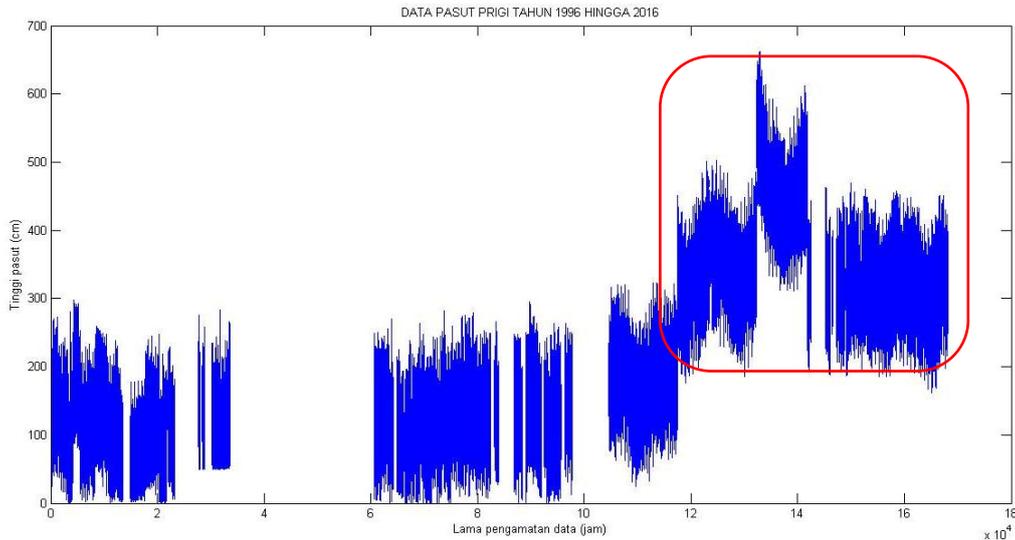
Selanjutnya, nilai SSH yang sudah terkoreksi dan dilakukan kontrol kualitas direferensikan terhadap undulasi geoid EGM96. Nilai yang diperoleh adalah nilai SLA yang selanjutnya akan digunakan untuk memperoleh tren kenaikan tinggi muka air laut.

B. Pengelolaan Data Pengamatan Pasang Surut

Dalam penanganan data pengamatan pasut, hal yang paling krusial adalah pengecekan data kosong. Jumlah data pasut pada suatu periode waktu, misalnya satu bulan, harus sama dengan jumlah jam atau menit pada bulan tersebut (tergantung pada sensor pasut yang digunakan). Jika jumlah datanya kurang, maka berarti ada data kosong. Data kosong harus diisi dengan nilai NaN (*Not A Number*) pada jam atau menit yang kosong tersebut. Hasil akhirnya, jumlah data akan sama dengan jumlah periode waktunya.

Data pasut yang sudah terbebas dari data kosong perlu dilakukan kontrol kualitas untuk mendeteksi adanya lonjakan data. Hal ini dikarenakan lonjakan data akan mempengaruhi nilai rerata tinggi muka air laut pada suatu periode waktu. Kontrol kualitas dapat dilakukan dengan menggunakan uji global sesuai dengan tingkat kepercayaan terhadap data.

Jika menggunakan data pasut periode panjang, hal lain yang perlu menjadi perhatian adalah ketika data terpenggal dengan nilai ketinggian yang berbeda signifikan (*shifted*). Fenomena ini disebut dengan bias referensi. Data yang mengalami bias referensi disajikan pada Gambar 2.1. Koreksi *shifting* dilakukan dengan cara menyamakan rerata kelompok data yang benar dengan rerata kelompok data yang mengalami bias referensi. Seharusnya, nilai rerata kedua kelompok data tersebut tidak berbeda signifikan. Selain itu, data akuisisi terakhir kelompok data awal dengan data akuisi pertama kelompok data selanjutnya harus menyambung atau kontinyu karena gelombang pasut membentuk gelombang sinusoidal.



Gambar 2.1 Data yang mengalami bias referensi ditunjukkan pada kotak merah

Untuk memperoleh nilai tren kenaikan tinggi muka air laut, perlu dilakukan perhitungan MSL (*Mean Sea Level*) dari data harian dan data bulanan pasut.

C. Pengelolaan Data Pengamatan GNSS

Pada penelitian ini, data pengamatan GNSS digunakan untuk kontrol nilai pergerakan vertikal yang diperoleh dari data satelit altimetri dan pasut. Data ini harus diolah menggunakan perangkat lunak *scientific* untuk menghasilkan nilai pergerakan vertikal yang teliti. Pada penelitian ini digunakan GAMIT/GLOBK untuk memperoleh nilai kecepatan pergerakan vertikal tanah.

Untuk mengidentifikasi deformasi baik deformasi horizontal maupun vertikal diperlukan data multikala. Minimal data pengamatan pada dua tahun yang berbeda dapat digunakan untuk mendeteksi deformasi. Semakin banyak periode tahun data maka akan lebih baik untuk mendeteksi tren pergerakan vertikal tiap tahun.

Data pengamatan GNSS, dalam hal ini adalah data RINEX juga perlu dilakukan kontrol kualitas. Terkadang, data RINEX yang diperoleh masih berformat Hatanaka (*.YYd), sehingga perlu dikonversi terlebih dahulu menjadi berformat RINEX *observation* (*.YYo). Setelah format data RINEX sudah diubah menjadi berformat *observation*, baru bisa dilakukan kontrol kualitas. Hasil kontrol kualitas ini adalah informasi keadaan ketika pengukuran serta informasi lain seperti waktu awal dan akhir pengukuran, jumlah satelit observasi, tipe *receiver*, tipe antena dan lain sebagainya.

Sebelum diolah, *file* yang akan diolah perlu dilakukan *editing* terlebih dahulu. File yang perlu dilakukan editing antara lain *lfile*. (*site coordinate*), *sittbl*. (*site control*), *sestbl* (*session control*), *station.info*, *process.default*, dan *sites.default*. Hasil pengolahan GAMIT kemudian perlu dievaluasi, terutama pada nilai *fract* dan *postfit nrms*. Nilai *fract* merupakan nilai perbandingan antara nilai *adjust* (menunjukkan besarnya perataan yang diberikan pada parameter) dengan nilai *formal* (menunjukkan

ketidakpastian pemberian bobot dalam perhitungan perataan kuadrat terkecil). Sedangkan nilai *postfit nrms* merupakan perhitungan normalisasi akar kuadrat rerata (Herring, 2010). Pengolahan GAMIT dapat diterima jika nilai *fract* <10 dan *postfit nrms* <0,25.

Pengolahan dilanjutkan dengan GLOBK menggunakan *file* hasil pengolahan GAMIT sebagai inputnya. *Editing file* perlu dilakukan pada tahap ini untuk penyesuaian format data atau konversi ekstensi data. Pada tahap pengolahan dilakukan visualisasi *time series* untuk mengetahui pola koordinat hasil pengolahan sehingga dapat dilihat adakah koordinat yang menyimpang terlalu jauh. Pengolahan dilanjutkan dengan menghitung vektor kecepatan menggunakan data koordinat semua tahun pengamatan di masing-masing stasiun pengamatan.

D. Kombinasi Data Satelit Altimetri dan Pasang Surut untuk Deteksi Pergerakan Vertikal

Hubungan tinggi muka air laut ($S(\lambda, \varphi)$) dengan pergerakan vertikal baik absolut maupun geosentris ($u((\lambda, \varphi))$) disajikan pada persamaan 4 (Kuo dkk., 2004).

$$u(\lambda, \varphi) = g(\lambda, \varphi) - S(\lambda, \varphi) \quad (4)$$

Dimana $g(\lambda, \varphi)$ adalah nilai perubahan tinggi muka air absolut, λ menunjukkan lintang dan φ menunjukkan bujur. Dari penelitian ini, nilai $g(\lambda, \varphi)$ menunjukkan nilai tinggi muka air laut dari data satelit altimetri dan nilai $S(\lambda, \varphi)$ adalah ketinggian muka air laut dari data pengamatan pasut. Terdapat *drift* antara kedua instrumen tersebut yang melekat pada nilai $u((\lambda, \varphi))$, namun diasumsikan besarnya sangat kecil dan dapat diabaikan.

Terdapat dua metode untuk mengkombinasikan data satelit altimetri dan pengamatan pasut, yaitu metode harian dan metode bulanan. Pada metode harian, data *along-track* satelit altimetri dibandingkan dengan data pengamatan pasut pada titik pengamatan terdekat. Sedangkan pada metode bulanan, data grid satelit

altimetri dibandingkan dengan data pengamatan pasut (Fenoglio-Marc dkk., 2012).

Pada metode harian, hanya kelompok data satelit altimetri yang berjarak 5 km dan 10 km dari daratan sepanjang *track* satelit altimetri. Metode ini harus menyelaraskan resolusi temporal antar kedua data. Oleh karena itu, pencuplikan data pasut dibatasi hanya data ketinggian pada tanggal yang sama dengan tanggal ketika *track* satelit altimetri melewati stasun pengamatan tersebut.

Setelah pencuplikan kedua data dilakukan, dilanjutkan dengan perhitungan SLR (*Sea Level Rise*) menggunakan metode regresi linier pada masing-masing data. Dari persamaan regresi linier akan diperoleh konstanta regresi linier, dimana konstanta *a* adalah *intercept* dan konstanta *b* adalah *slope*. Persamaan untuk memperoleh konstanta regresi linier disajikan pada persamaan 5 dan 6. *X* menunjukkan rerata variabel *x* dan *Y* adalah rerata variabel *y*.

$$b = \frac{\sum xy - nXY}{\sum x^2 - nX^2} \quad (5)$$

$$a = Y - bX \quad (6)$$

Nilai konstanta regresi linier tersebut kemudian digunakan untuk menghitung SLR dengan mencari beda tinggi kemiringan (*slope*) kemudian dibagi dengan banyaknya tahun data (*n*).

Berbeda dengan metode harian, pada metode bulanan dibandingkan rerata bulanan data pengamatan pasut dengan grid bulanan data satelit altimetri. Data pengamatan pasut perlu diolah dengan menghitung nilai rerata ketinggian muka air laut setiap bulan pengamatan. Komponen musiman perlu dihilangkan dari data rerata bulanan tersebut.

Data SLA bulanan satelit diperlukan dalam pembuatan grid. Titik grid terdekat dengan lokasi pengamatan digunakan untuk dibandingkan dengan rerata bulanan data pasut di lokasi pengamatan yang sama. Selanjutnya, perhitungan SLR metode regresi linier juga dilakukan pada metode ini.

Untuk memperoleh tren linier perbedaan data pasut dan satelit altimetri dapat dilakukan dengan dua cara. Cara yang pertama yaitu dengan menghitung selisih antara tren data pasut dan data satelit altimetri. Cara yang kedua adalah dengan menghitung tren dari selisih data pasut dan satelit altimetri (Fenoglio-Marc dkk., 2011). Uji signifikansi dari nilai SLR dan standar deviasinya perlu dilakukan dengan menerapkan uji *t* (*student*).

3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi kenaikan tinggi muka air laut dari data pasut dan data satelit altimetri dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode bulanan dan metode harian. Nilai tinggi muka air laut yang diperoleh dari kombinasi kedua data tersebut kemudian dikonfirmasi menggunakan nilai pergerakan vertikal yang diperoleh dari pengolahan data GNSS.

A. Nilai SLR dari Data Pengamatan Pasang Surut

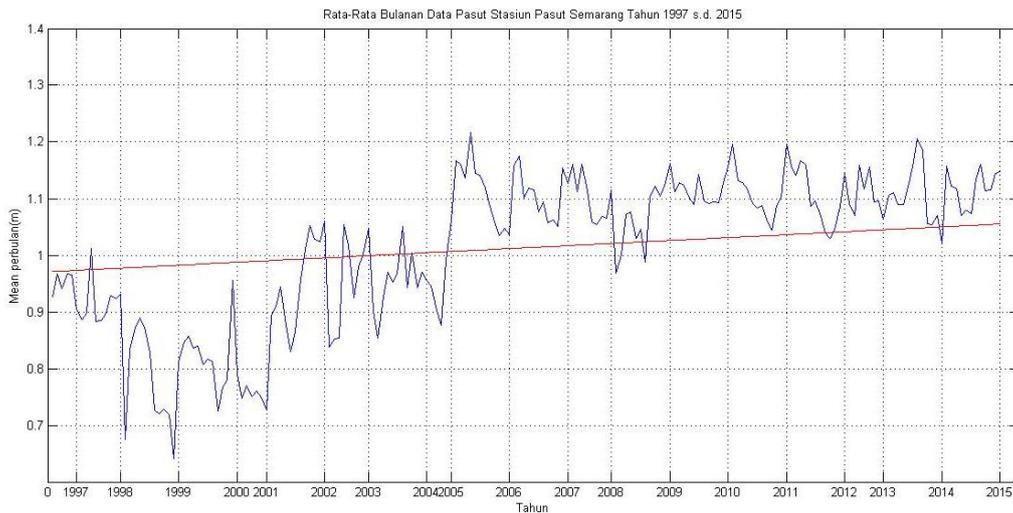
Nilai kenaikan tinggi muka air laut dari data pasut dengan metode harian diperoleh dari nilai bacaan pasut pada hari yang sama dengan tanggal satelit altimetri melintas, sedangkan pencuplikan data satelit altimetri dilakukan untuk data pada jarak 5 km dan 10 km dari daratan. Data tersebut harus diurutkan berdasarkan tanggal karena dalam pengamatan *time series* dibutuhkan data dengan penanggalan yang urut yakni dari tanggal terdahulu hingga tanggal terkini. Data harian yang sudah urut tersebut dihitung nilai kenaikan tinggi muka air lautnya menggunakan regresi linier. Pada metode bulanan, data harian pasut dikumpulkan menjadi data perbulan untuk selanjutnya dihitung SLR menggunakan regresi linier. Metode regresi linier pada metode harian maupun bulanan akan menghasilkan persamaan garis tren, SLR dan nilai ketelitian estimasi garis tren atau yang disebut dengan *Standard Error of Estimate* (SEE).

Perhitungan nilai SLR dan SEE data pasut menggunakan metode harian menghasilkan nilai kenaikan maupun penurunan tinggi muka air laut yang sangat beragam. Perhitungan nilai SLR dan SEE dilakukan pada masing-masing penanggalan sesuai jarak satelit altimetri terhadap daratan (5 km dan 10 km) serta berdasarkan *track* satelit altimetri. Selain itu, nilai yang bervariasi tersebut juga disebabkan karena suatu perairan mengalami fenomena pasang dan surut pada satu hari tergantung pada tipe pasang surut di perairan tersebut.

Jika pada saat penanganan data pengamatan pasut dilakukan koreksi *shifting* terhadap data, maka lebih baik data hasil koreksi *shifting* dikelompokkan tersendiri atau dipisahkan dengan periode data lain yang tidak mengalami koreksi data *shifting*.

Nilai rerata bulanan pasut akan memberikan hasil yang lebih stabil daripada rerata harian. Hal ini dikarenakan rerata bulanan dipengaruhi oleh variasi bulanan bulan, sedangkan variasi hariannya sudah tidak terlihat. Oleh karena itu, kenaikan dan penurunan tinggi muka air dikarenakan fenomena pasang dan surut harian sudah tidak nampak. Perhitungan rerata dan SLR harus dilakukan dengan kekosongan data yang minimal. Kekosongan data lebih dari satu tahun tidak dapat digabungkan dengan data tahun berikutnya sehingga perlu dipisah dalam perhitungan SLR untuk menjaga kebenaran nilai SLR hasil hitungan.

Pada Gambar 3.1 ditunjukkan plot rerata bulanan data pasut di salah satu area penelitian yaitu stasiun pasut Semarang dari data pengamatan selama 19 tahun. Semua nilai rerata bulanan data pasut selama periode tersebut digunakan untuk menghitung nilai tren kenaikan tinggi muka air laut yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai *intercept* sebesar 0,971 dan nilai *slope* 0,000431 sehingga menghasilkan persamaan garis $y = 0,971 + 0,000431x$. Nilai SLR yang diperoleh yaitu sebesar 4,4 mm/tahun dan SEE 0,1 mm. Nilai yang diperoleh tersebut sangat dipengaruhi oleh nilai rerata bulanan di awal dan akhir periode.



Gambar 3.1 Contoh plot data bulanan data pasut (garis biru) dan tren linier (garis merah)

Hasil SLR yang terjadi dapat dihubungkan dengan peristiwa yang terjadi di laut di waktu yang sama. Contohnya, kenaikan dan penurunan tinggi muka air laut dapat dicocokkan atau dikonfirmasi dengan *Oceanic Nino Index* (ONI) yaitu indeks peristiwa La Nina dan El Nino. Di wilayah Indonesia, kenaikan tinggi muka air laut dapat dihubungkan dengan peristiwa La Nina. Kebalikannya, peristiwa penurunan tinggi muka air laut dapat dihubungkan dengan peristiwa El Nino.

B. Nilai SLR dari Data Satelit Altimetri

Perhitungan SLR dari data satelit altimetri dilakukan dengan dua metode yang sama dengan data pengamatan pasut, yaitu metode harian dan bulanan. Pada metode harian, untuk menghitung nilai SLR perlu melakukan pengurutan setiap kelompok data berdasarkan *cycle* terdahulu hingga *cycle* terkini. Nilai SLA yang digunakan untuk menghitung tren kenaikan tinggi muka air laut merupakan nilai pada *track* satelit altimetri yang melewati stasiun pasut pengamatan.

Nilai SLR yang dihasilkan bisa saja tidak sesuai atau tidak merepresentasikan keadaan yang seharusnya,

misalnya nilai SLR didominasi oleh nilai positif maupun negatif yang sangat besar meskipun nilai SEE cukup baik seperti yang disajikan pada Tabel 3.1. Hanya nilai SLR pada stasiun pasut Prigi dengan jarak 10 km dari daratan yang dilewati oleh *track* 140 yang menghasilkan nilai positif. Ketidaksesuaian hasil ini dapat disebabkan karena beberapa faktor antara lain karena nilai SLA data satelit altimetri yang digunakan berjarak jauh dari posisi stasiun pasut yang akan dibandingkan. Jarak ini diambil dari garis lurus antara stasiun pasut dengan titik akuisisi satelit altimetri terdekat dengan daratan.

Selain dipengaruhi karena jarak *track* yang terlalu jauh dengan posisi satelit altimetri, data harian satelit altimetri juga masih mengandung banyak *noise*. Meskipun penanganan data satelit altimetri sudah dilakukan dengan teliti, ternyata masih belum dapat menghilangkan *noise* lain yang belum terdeteksi. Meskipun satelit altimetri memberikan hasil yang baik pada perairan terbuka, beberapa masalah bertambah di sekitar daratan, berhubungan dengan lemahnya koreksi geofisik pada sinyal pantulan altimetri pada daratan (Gommenginger dkk., 2011).

Tabel 3.1 Koordinat titik kontrol tanah

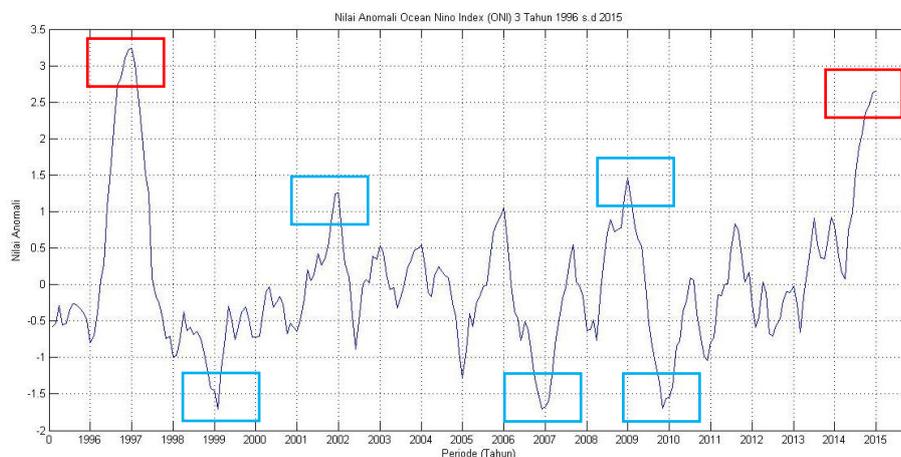
| Stasiun | Jarak | Track satelit | Periode | Persamaan | SLR (mm/th) | SEE (mm) |
|----------|-------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|----------|
| Semarang | 5 km | 064 | 2002 s.d 2015 | $y = 2,508 - 0,00094x$ | -7,3 | 0,6 |
| | 10 km | 064 | 2002 s.d 2015 | $y = 2,368 - 0,0002x$ | -2,5 | 0,4 |
| | 5 km | 127 | 2002 s.d 2015 | $y = 1,995 - 0,00023x$ | -2,9 | 0,5 |
| | 10 km | 127 | 2002 s.d 2015 | $y = 1,979 - 0,00022x$ | -2,7 | 0,4 |
| Prigi | 5 km | 127 | 2009 | $y = 0,815 - 0,00092x$ | -25,8 | 0,5 |
| | 5 km | 127 | 2010 s.d 2015 | $y = 0,974 - 0,00016x$ | -5,3 | 0,5 |
| | 10 km | 127 | 2002 s.d 2009 | $y = 0,799 - 0,00011x$ | -1,6 | 0,5 |
| | 10 km | 127 | 2010 s.d 2015 | $y = 0,827 - 0,000069x$ | -2,4 | 0,5 |
| | 5 km | 140 | 2009 | $y = 0,454 - 0,00445x$ | -80 | 0,4 |
| | 5 km | 140 | 2010 s.d 2015 | $y = 0,500 - 0,0007x$ | -10,9 | 0,7 |
| | 10 km | 140 | 2002 s.d 2009 | $y = 0,453 - 0,0004x$ | -2,01 | 0,6 |
| | 10 km | 140 | 2010 s.d 2015 | $y = 0,388 - 0,000512x$ | 8,01 | 0,5 |

Berbeda dengan metode harian, nilai kenaikan tinggi muka air laut data satelit altimetri metode bulanan diperoleh dari nilai SLA bulanan interpolasi di titik grid terdekat dengan stasiun pasut pengamatan. Grid dari data bulanan data satelit altimetri dapat dibentuk menggunakan berbagai metode interpolasi, contohnya metode Kriging dengan ukuran grid tertentu. Pada penelitian ini dibuat grid dengan ukuran 0,02 derajat. Semakin baik pemilihan metode interpolasi dan semakin rapat ukuran grid maka akan memberikan nilai interpolasi yang makin baik. Pembentukan grid lebih baik menggunakan dua *track* satelit altimetri yang mengapit posisi stasiun pasut pengamatan. Nilai SLA bulanan dihitung pada lokasi stasiun pasut pengamatan dari data *track* multisatelit altimetri yang melewatinya.

Hasil interpolasi grid ini adalah nilai rerata bulanan SLA yang selanjutnya dapat dihitung persamaan garis *trend*, SLR dan SEE seperti pada data pengamatan pasut. Untuk pemahaman lebih lanjut, fluktuasi nilai rerata

bulan pada suatu periode yang panjang dapat dicocokkan dengan fenomena yang terjadi di laut seperti La Nina dan El Nino serta fenomena alam dan buatan yang lain.

Peristiwa La Nina dan El Nino dapat dilihat dari data indeks Nino 3 seperti yang disajikan pada Gambar 3.2. Peristiwa *strong* El Nino ditunjukkan dengan kotak merah, sedangkan *moderate* El Nino dan La Nina ditunjukkan pada kotak biru. Dari uji korelasi, diperoleh hasil bahwa terdapat korelasi negatif antara nilai SLA satelit altimetri dengan data indeks Nino3. Hal ini berarti hubungan keduanya berkebalikan, dimana semakin tinggi nilai SLA maka akan semakin rendah nilai indeks Nino3 dan sebaliknya. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh Khasanah pada 2015, diketahui bahwa peristiwa ENSO (*El Nino Southern Oscillation*) berpengaruh terhadap perubahan tinggi muka air laut sebesar 11,25%, khususnya di pulau Jawa.



Gambar 3.2 Data Indeks Nino3 yang menunjukkan periode peristiwa El Nino dan La Nina

C. Nilai Pergerakan Vertikal dari Data GNSS

Kualitas data pengamatan GPS yang digunakan dalam penelitian perlu diperhatikan karena data tersebut akan digunakan sebagai kontrol. Kualitas data GPS dapat dilihat dari hasil TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*) data RINEX. Hasil keluaran uji kualitas (*quality check*) dengan TEQC ada dua macam, yaitu laporan ringkas yang berisi ASCII *time plot* dan ringkasan beberapa parameter serta laporan panjang yang membahas mengenai keterangan lebih detail mengenai parameter (Lestari, 2006).

Proses kontrol kualitas dilakukan pada masing-masing *day* setiap stasiun dengan metode *full check*. Hasil pengecekan kualitas ini adalah informasi mengenai data seperti nilai MP1, MP2, IOD dan IOD_MP *slips*. Nilai MP1 menunjukkan efek *multipath* pada sinyal L1, sedangkan nilai MP2 menunjukkan efek *multipath* pada sinyal L2. Nilai IOD dan IOD+MP *slips* yang digunakan sebagai parameter adalah nilai yang lebih besar dari *cut off elevation* yang ditentukan saat pengukuran. Cuplikan hasil kontrol kualitas dengan TEQC disajikan pada Gambar 3.3.

```

Observation interval : 30.0000 seconds
Total satellites w/ obs : 30
NAVSTAR GPS SVs w/o OBS : 30 32
NAVSTAR GPS SVs w/o NAV :
Rx tracking capability : 14 SVs
Poss. # of obs epochs : 2880
Epochs w/ observations : 2880
Epochs repeated : 0 (0.00%)
Possible obs > 0.0 deg : 33543
Possible obs > 10.0 deg : 26758
Complete obs > 10.0 deg : 22636
Deleted obs > 10.0 deg : 959
Masked obs < 10.0 deg : 5015
Obs w/ SV duplication : 0 (within non-repeated epochs)
Moving average MP12 : 0.450111 m
Moving average MP21 : 0.700288 m
Points in MP moving avg : 50
Mean S1 : 43.79 (sd=4.64 n=23395)
Mean S2 : 30.21 (sd=7.26 n=22664)
No. of Rx clock offsets : 0
Total Rx clock drift : 0.000000 ms
Rate of Rx clock drift : 0.000 ms/hr
Avg time between resets : Inf minute(s)
Freq no. and timecode : 2 12297 fffffff
Report gap > than : 10.00 minute(s)
epochs w/ msec clk slip : 0
other msec mp events : 1 (: 64) {expect ~= 1:50}
IOD signifying a slip : >400.0 cm/minute
IOD slips < 10.0 deg* : 0
IOD slips > 10.0 deg : 28
IOD or MP slips < 10.0+ : 0
IOD or MP slips > 10.0 : 31

```

Gambar 3.3 Contoh cuplikan hasil TEQC

Nilai MP1 dan MP2 yang kurang dari 0,5 meter menunjukkan bahwa data pengamatan berkualitas baik (Herring, dkk., 2010 dalam Prasadya, 2015). Nilai IOD dan IOD+MP *slips* yang lebih dari 100 disebabkan karena kondisi atmosfer yang kurang baik, khususnya pada lapisan ionosfer yang menyebabkan terjadinya keterlambatan sinyal GPS dari satelit ke pengamat (Taftazani, 2013).

Pengolahan data dilanjutkan dengan GAMIT/GLOBK untuk memperoleh koordinat teliti titik pengamatan. Pada penelitian ini digunakan koordinat toposentrik pada komponen *Up* sebagai komponen vertikal. Koordinat hasil pengolahan ini selanjutnya digunakan untuk perhitungan kecepatan, khususnya kecepatan pergerakan vertikal.

D. Nilai Pergerakan Vertikal dari Selisih *Trend* Data Pasut dan Satelit Altimetri

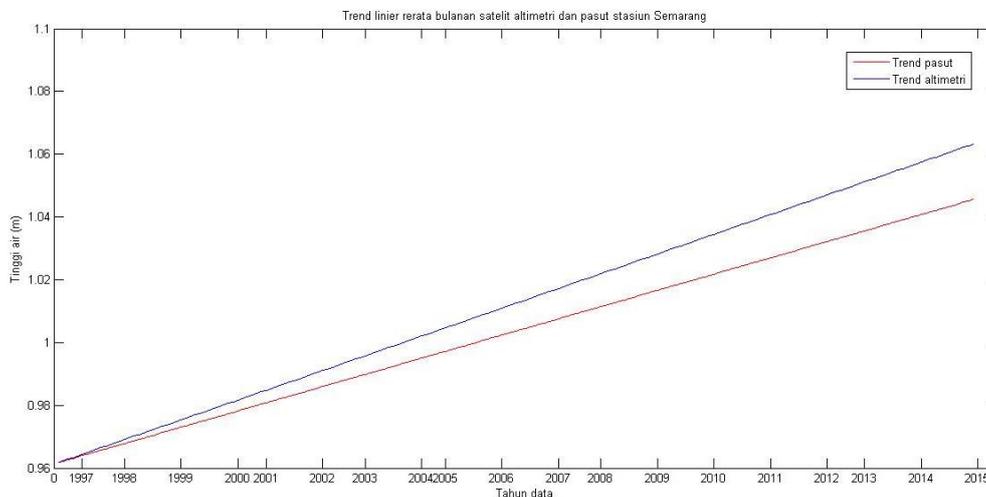
Pergerakan vertikal tanah yang diperoleh dari nilai tren linier antara data satelit altimetri dan data pasut dapat diperoleh dengan mengurangkan tren linier dari data satelit altimetri dengan tren linier dari data pasut. Terdapat dua metode yang digunakan untuk membandingkan antara data pasut dengan data satelit altimetri yaitu dengan metode harian dan metode bulanan.

Nilai selisih tren dari metode harian menghasilkan nilai yang kurang baik karena data satelit altimetri harian lebih banyak mengandung *noise* dibandingkan nilai rerata bulanan data satelit altimetri. Pada metode harian, digunakan nilai SLA yang dekat dengan daratan yaitu hingga jarak 10 kilometer. Akan tetapi, pada umumnya data satelit altimetri hingga jarak 50 kilometer dari daratan memiliki kualitas yang rendah disebabkan karena

beberapa alasan teknis seperti masalah *waveform*. Beberapa koreksi geofisik khusus juga perlu diperhitungkan pada data dekat daratan atau pesisir. Oleh karena itu, metode harian kurang tepat untuk diterapkan.

Pada metode bulanan, SLA satelit altimetri dan data pasut dapat menunjukkan pola yang sesuai. Menggunakan uji korelasi, menunjukkan nilai korelasi yang positif sehingga diartikan bahwa terdapat hubungan searah antara kedua variabel. Nilai selisih tren SLR data pasut dan satelit altimetri dapat menghasilkan nilai positif maupun negatif. Akan tetapi, dengan konsep bahwa nilai ketinggian muka air laut dari data satelit altimetri merupakan nilai geosentris yang tidak dipengaruhi oleh pergerakan lempeng, maka nilai SLR dari data satelit altimetri dijadikan acuan pada perhitungan selisih. Jika nilai tren SLR satelit altimetri dikurangi dengan nilai tren SLR data pasut menghasilkan nilai yang positif, hal ini mengindikasikan terjadinya penurunan tanah pada lokasi stasiun pasut pengamatan seperti yang disajikan pada Gambar 3.4. Sebaliknya, jika bernilai negatif maka menunjukkan adanya fenomena kenaikan tanah di lokasi tersebut.

Gambar 3.4 menunjukkan dua tren linier, yaitu tren kenaikan tinggi muka air laut dari data pasut (garis merah) dan tren dari data satelit altimetri (garis biru). Diperoleh hasil, bahwa di stasiun pasut Semarang diperoleh nilai tren dari data satelit altimetri sebesar 6,6 mm/tahun dan tren data pasut sebesar 4,4 mm/tahun. Nilai tren dari data satelit altimetri lebih besar daripada tren dari data pasut, menunjukkan bahwa terjadi penurunan muka tanah di stasiun pasut Semarang.



Gambar 3.4 Visualisasi tren linier satelit altimetri dan pasut

Nilai selisih tren data satelit altimetri dan data pasut dapat mendeteksi adanya kenaikan maupun penurunan permukaan tanah. Hal ini sama dengan dengan pola tren vertikal atau kecepatan pergerakan vertikal dari data pengamatan GNSS, misalnya pada stasiun pasut Semarang diperoleh nilai kecepatan pergerakan vertikalnya sebesar -76,74 cm/tahun. Meskipun memberikan pola pergerakan vertikal yang sama, akan tetapi besarnya nilai pergerakan

vertikal bisa saja berbeda. Hal ini dapat disebabkan karena pengamatan GNSS juga memiliki kelemahan pada komponen vertikalnya.

Metode penentuan pergerakan vertikal dengan memanfaatkan data pengamatan pasang surut dan satelit altimetri dapat digunakan sebagai observasi awal di suatu kawasan pesisir mengenai fenomena pergerakan vertikal. Metode ini dapat diterapkan di kawasan pesisir yang tidak

teramati oleh *receiver* GNSS, namun memiliki data pasut yang memadai. Lebih lanjut, hal ini dapat digunakan sebagai tindakan pencegahan akibat bencana yang disebabkan karena kenaikan maupun penurunan tanah.

4. Kesimpulan

Dari penelitian dapat diketahui bahwa metode penentuan pergerakan vertikal dari data satelit altimetri dan pasut dapat dilakukan, khususnya pada wilayah pesisir yang tersedia data pengamatan pasang surut. Metode penanganan data dilakukan dengan metode harian dan bulanan, namun metode bulanan memberikan hasil yang lebih baik daripada metode harian. Oleh karena itu, metode penanganan data satelit altimetri dan pasut dengan metode bulanan lebih dianjurkan. Pergerakan vertikal tanah dapat terdeteksi dari nilai selisih tren antara kedua data. Hasil tersebut sama dengan pola pergerakan vertikal tanah yang terdeteksi menggunakan data pengamatan GNSS meskipun memiliki nilai yang berbeda. Oleh karena itu, metode penentuan pergerakan vertikal dari data hidrologis dapat digunakan sebagai observasi awal pada suatu kawasan pesisir mengenai fenomena pergerakan vertikal yang terjadi pada kawasan tersebut. Metode ini dapat diterapkan untuk wilayah yang tidak teramati oleh titik pengamatan GNSS, namun memiliki data pasut yang memadai. Dengan diketahuinya fenomena pergerakan vertikal yang terjadi pada suatu kawasan, maka penanganan lebih lanjut untuk mencegah bencana dapat segera dilakukan.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (*The authors declare no competing interest*).

6. Referensi

Abidin, H.Z. (1995), Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. Pradnya Paramita, Bandung.
Basith, A. (2001). Analisis Harmonik Pasang Surut dengan menggunakan Data Satelit Altimetri TOPEX/Poseidon. Tesis. Institut Teknologi Bandung : Bandung.
Faridatunnisa, M. (2015). Evaluasi Ketelitian Model Pasang Surut Regional dan Global menggunakan Data Pasang Surut Terestris dan Satelit Altimetri di Wilayah Perairan Pulau Jawa. Skripsi. Departemen Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada.

Fenoglio-Marc, L., Braitenberg, C., dan Tunini, L. (2011). Sea Level Variability and Trends in the Adriatic Sea in 1993-2008 from Tide Gauges and Satellite Altimetry. Elsevier Ltd., Physics and Chemistry of the Earth 40-40(2012)47-58.

Fenoglio-Marc, L., Schone, T., Illigner, J., Becker, Manurung, P. & Khafid. (2012). Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. *Marine Geodesy*, (January 2013), 120917123827008. <http://doi.org/10.1080/01490419.2012.718682>.

Garcia, D., Vigo, I., Chao, B.F. & Martinez, M.C. (2007). Vertical Crustal Motion along the Mediterranean and Black Sea Coast Derived from Ocean Altimetry and Tide Gauge Data. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (2007) 851-863 DOI 10.1007/s00024-007-0193-8.

Gommenginger, C., Thibaut, P., Fenoglio-Marc, L., Quartly, G., Deng, X., Gomez-Enri, J., Challenor, P. & Gao, Y. (2011). Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts : A Review of Retracking Methods and Some Applications to Coastal Waveforms. *Coastal Altimetry*, Springer-Verlag Berlin.

Indonesia, R. (2008). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana.

Kuo, C. Y. (2004) Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia. *Geophysical Research Letters*, 31(1), L01608. <http://doi.org/10.1029/2003GL019106>.

Lestari, D. (2006) GPS Study for Resolving the Stability of Borobudur Tempel Site. Tesis. University of New South Wales : Sydney.

Putra, I.W.K.E. (2013). Evaluasi Hasil Post-Processing Data Satelit Altimetri Envisat sebaga Data Prediksi Ancaman Peningkatan Muka Air Laut untuk Pemetaan Genangan Wilayah Pesisir. Tesis. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Rosmorduc, V. (2009). Basic Radar Altimetry Toolbox Practical. Bregan, Norway:ESA.

Taftazani, M.I. (2013). Analisis Geodinamika Lima Stasiun Pasut Pulau Jawa dengan Data Pengamatan GPS Tiga Epok. Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Trisirisatayawong, I., Naeije, M., Simons, W., & Fenoglio-Marc, L. (2011). Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multi-satellite altimetry. *Global and Planetary Change*, 76(3-4), 137-151. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.12.010>.