
ANALISIS KENAIKAN MUKA AIR LAUT INDONESIA TAHUN 1993-2018 MENGGUNAKAN DATA ALTIMETRI

Eko Yuli Handoko¹, Yuwono², Reny Ariani³

^{1,2,3}Departemen Teknik Geomatika, FTSLK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

e-mail: ¹ekoyh@geodesy.its.ac.id

Abstrak

Kenaikan muka air laut (sea level rise) merupakan konsekuensi dari perubahan iklim yang memiliki dampak signifikan terhadap kehidupan sosial, ekonomi, dan infrastruktur, serta ancaman tenggelamnya kawasan pesisir Indonesia yang ditinggali oleh 60% penduduknya. Sejak akhir abad ke-19, perubahan kedudukan air laut diamati dari stasiun pasang surut di sepanjang garis pantai. Namun, pengamatan stasiun pasang surut memiliki keterbatasan dalam jumlah, distribusi, dan jangkauannya, serta adanya pengaruh land subsidence. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis tren kenaikan muka air laut Indonesia menggunakan data pengamatan misi referensi satelit altimetri, yaitu Topex/Poseidon, Jason 1, Jason 2, dan Jason 3. Setelah dilakukan least square intercalibrated dan a-seasonal-trend decomposition procedure based on loess diketahui bahwa laju sea level rise di Indonesia +4,5 mm/tahun pada periode tahun 1993-2018. Tren linier bernilai positif ini menunjukkan bahwa ketinggian muka laut di Indonesia akan terus meningkat dengan persamaan $y = 4,6x - 9133,5$ mm, dimana y adalah sea level anomaly dan x adalah waktu. Sehingga berdasarkan hasil tersebut dapat dilakukan perencanaan pra-kejadian terhadap dampak dari sea level rise yang akan mendatang.

Kata kunci : Altimetri, Intercalibrated, Sea level, Loess

Abstract

Sea level rise is a consequence of climate change which has a significant impact on social life, economy, and infrastructure, as well as the threat of sinking of Indonesia's coastal areas inhabited by 60% of its population. Since the end of the 19th century, changes in sea level were observed from tidal stations along the coastline. However, tidal station observations have limitations in number, distribution, and range, as well as the influence of land subsidence. Therefore, this study analyzes the trend of rising sea levels in Indonesia using observational data altimetry satellite reference missions, namely Topex / Poseidon, Jason 1, Jason 2, and Jason 3. After least square intercalibrated and a-seasonal-trend decomposition procedure based on loess it is known that the rate of sea level rise in Indonesia is +4.5 mm / year in the period 1993-2018. This positive linear trend shows that sea level in Indonesia will continue to increase with the equation $y = 4.6x - 9133.5$ mm, where y is the sea level anomaly and x is time. Thus, based on these results a pre-event planning can be carried out on the impact of the upcoming sea level rise.

Keywords : Altimetry, Intercalibrated, Sea level, Loess

PENDAHULUAN

Sea level rise atau kenaikan muka air laut sebagai konsekuensi dari perubahan iklim menjadi masalah serius bagi penduduk daerah pesisir. Kenaikan air laut dapat menyebabkan penggenangan daerah dataran rendah, banjir, dan intrusi air laut ke akuifer (Nicholls, 2010). Selain itu, kenaikan muka air laut memiliki dampak signifikan terhadap sosio-ekonomi nasional, infrastruktur dan lingkungan, serta ancaman tenggekannya daataran di sekitar wilayah pesisir, yang telah menjadi tempat tinggal sekitar 75% penduduk di kawasan Asia Pasifik. Sedangkan, Asia Pasifik sendiri merupakan tempat tinggal oleh lebih dari separuh penduduk dunia (McGranahan, et.al., 2007).

Kawasan pesisir Indonesia sendiri ditinggali oleh 60% penduduknya. Aktivitas di wilayah pesisir juga berfungsi secara sosial dan ekonomi, yaitu karena sebagian wilayah pesisir merupakan kota-kota besar. Sebagian lainnya, wilayah pesisir Indonesia digunakan sebagai pusat perdagangan nelayan dan juga pariwisata. Selain itu, wilayah pesisir biasa digunakan sebagai dermaga atau penghubung antar pulau, sehingga infrastruktur di wilayah pesisir bernilai ekonomi tinggi. Oleh karena itu, dampak yang signifikan dari adanya kenaikan muka air laut akan menjadi permasalahan jangka panjang bagi Indonesia. Terlepas dari wilayah pesisirnya, lokasi geografis Indonesia yang berada antara Samudera Hindia dan Samudera Pasifik, serta antara Benua Asia dan Benua Australia, membuat tingkat mobilisasi perdagangan menggunakan jalur laut di Indonesia sangat padat. Sehingga, fenomena yang terjadi di laut sangat penting untuk dipelajari (Dahuri, et.al., 2008).

Sejak akhir abad ke-19, perubahan kedudukan air laut diamati dari stasiun pasang surut di sepanjang garis pantai (Church and White, 2011). Namun, pengamatan stasiun pasang surut memiliki keterbatasan dalam beberapa hal. Keterbatasan tersebut diantaranya adalah jumlah, distribusi, dan jangkauan yang terbatas di daerah sekitar pantai, serta dampak lokal seperti pergerakan tanah secara vertikal (land subsidence) dan karakteristik pasang surut lokal (Woppelmann and Marcos, 2016).

Era satelit altimetri membawa revolusi dalam pengamatan variabilitas permukaan laut.

Pada tahun 1992, NASA (National Aeronautics and Space Administration) dan CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) meluncurkan misi gabungan TOPEX / Poseidon dan kemudian pada tahun 2001 meluncurkan misi lanjutan yaitu satelit Jason-1. Pada tahun 2008 diluncurkan satelit Jason-2 / OSTM dengan tambahan bantuan dari EUMETSAT (Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) dan NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), kemudian dilanjut dengan misi satelit Jason 3. Misi satelit Jason Series ini mampu mengukur tinggi permukaan laut di sepanjang jalur permukaan yang sama dengan periode orbit yang berulang dalam 9,9156 hari di ketinggian sekitar 1336 km dengan sudut inklinasi 66°. Catatan data jangka panjang yang presisi ini membantu untuk studi pengamatan muka laut secara spasial dan temporal (Nerem, et.al., 2010).

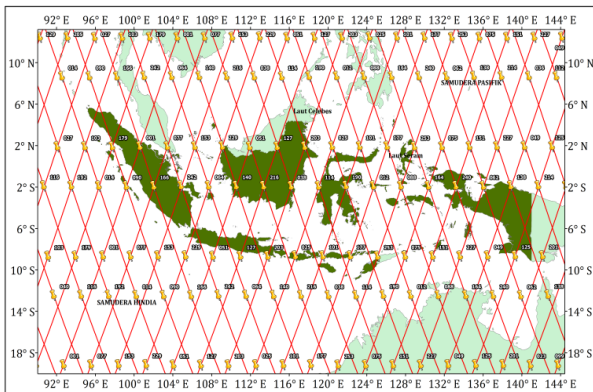
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren kenaikan muka air laut Indonesia selama 25 tahun, yaitu tahun 1993-2018 berdasarkan data pengamatan satelit altimetri Topex/Poseidon, Jason 1, Jason 2, dan Jason 3, agar didapatkan tren kenaikan muka air laut di Indonesia yang akurat. Penelitian ini hanya menggunakan data altimetri dari Radar Altimeter Database System (RADS). Penggunaan data yang murni hanya melibatkan data altimetri tanpa data pengukuran langsung di lapangan ini didasarkan pada hasil penelitian L. Fenoglio-Marc (2010) berjudul "Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region" yang menunjukkan bahwa data pengamatan satelit altimetri dan data insitu stasiun pasang surut memiliki nilai korelasi yang sangat kuat. Hal tersebut berarti bahwa pengukuran insitu meningkatkan kualitas data pengamatan altimetri, namun peningkatan yang ditunjukkan tidak terlalu signifikan (Fenoglio-Marc, et.al., 2010).

METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah seluruh laut di Indonesia dengan batas koordinat 13° LU - 20° LS dan 90° BT - 145° BT. Lokasi penelitian terdiri dari 17.600 pulau dan garis pantai sepanjang 81.000 km (Dahuri, et.al., 2008). Lokasi penelitian dilewati oleh 43 pass orbit satelit altimetri Topex /

Poseidon, Jason 1, Jason 2, dan Jason 3 dan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ground Track Satelit T/P dan Jason di Indonesia.

(Sumber: Centre National d'Etudes Spatiales 2016)

Tahapan Penelitian

Tahapan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu data RADS. Dataset RADS (Radar Altimeter Database System) berisi semua parameter koreksi data satelit altimetri serta nilai pengamatan satelit altimetri Jason 1, Jason 2, dan Jason 3 yang meliputi range dan altitude satelit dari referensi ellipsoid. Data model MSS juga diambil dari RADS. Set data berformat NetCDF yang nantinya akan diterjemahkan menggunakan bahasa MATLAB R2013. RADS merupakan sistem database data yang menyediakan data satelit altimetri berformat ASCII dari berbagai misi satelit altimetri. RADS dikembangkan oleh Delft Institute for Earth-Oriented Space Research dan NOAA Laboratory for Satellite Altimetry. Data RADS tersedia secara gratis di <http://rads.tudelft.nl/rads/>.

2. Penerapan Koreksi

Pada penelitian ini dipilih model koreksi terbaik dan paling akurat untuk penggunaan data altimetri di wilayah Indonesia. Perhitungan koreksi ini akan menghasilkan SSH (sea surface height) terkoreksi, yang kemudian digunakan untuk menghitung SLA (sea level anomaly). Semua perhitungan dilakukan menggunakan script sederhana di MATLAB R2013. Perhitungan yang dilakukan menggunakan formula sebagai berikut (Andersen, 2010):

$$\Delta R_{Geo_{corr}} = \Delta h_{dry} + \Delta h_{wet} + \Delta h_{iono} + \Delta h_{SSB} + \Delta h_{DAC} + \Delta h_{tides} + \Delta h_{RFO} \quad (1)$$

$$SSH = H - R_{obs} - \Delta R_{Geo_{corr}} \quad (2)$$

dimana Δh_{dry} = dry trophospheric correction, Δh_{wet} = wet trophospheric correction, Δh_{iono} = koreksi ionosfer, Δh_{SSB} = sea state bias, Δh_{DAC} = dynamic atmospheric correction, Δh_{tides} = koreksi pasang surut, Δh_{RFO} = koreksi kerangka acuan offset, h_{SLA} = sea level anomaly, SSH = sea surface height, dan h_{MSS} = mean sea surface. Semua variabel tersebut memiliki satuan meter, dan dalam kebutuhan analisis satuan SLA di akhir dapat dikonversi menjadi mm.

Dry Trophospheric Correction (DTC) yang digunakan untuk perhitungan delay atmosfer pada jalur kering didapatkan dari NWM (Numerical Weather Model) yang dikembangkan oleh ERA-Interim pada grid $0,75^{\circ} \times 0,75^{\circ}$ dengan range -2,4 hingga 2,1 meter. Wet Trophospheric Correction (WTC) yang digunakan untuk koreksi troposfer basah adalah model ERA-Interim dengan range -0,6 hingga 0 meter (Scharroo, 2010).

Koreksi ionosfer yang dipilih adalah model smoothed dual frequency yang mampu mengurangi variasi SLA hingga 2,5 cm² hingga ke jarak 25 km dekat pantai. Range koreksi ini yaitu -0,4 hingga 0,04 meter (Handoko, et.al., 2017). Koreksi akibat Sea State Bias (SSB) yang dipilih adalah model Tran2012 karena mampu mengurangi variasi SLA untuk satelit Jason 1 sebesar 1 cm² dan Jason 2 sebesar 2,5 cm² (Handoko, et, al., 2017). Dynamic Atmospheric Correction (DAC) yang dipilih adalah model local mean of MOG2D dengan range -1 hingga 1 meter. Koreksi Tides meliputi ocean tides, load tides, solid tides, dan pole tides. Model ocean tides dan load tides yang digunakan adalah GOT4.10 dengan range -5 hingga 5 meter (Scharroo, 2010).

3. Perhitungan SLA

Sea level anomaly (SLA) dihitung menggunakan script sederhana di MATLAB R2013 dengan formula sebagai berikut:

$$h_{SLA} = SSH - h_{MSS} \quad (3)$$

Model MSS yang digunakan dalam perhitungan adalah CNES-CLS11 untuk Topex/Poseidon dan CNES-CLS15 untuk Jason 1, Jason 2, dan Jason 3. Rentang MSS yang digunakan 200 hingga 200 meter [9]. Kemudian dilakukan kontrol kualitas dalam range -2 hingga 2 meter terhadap hasil SLA. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan data yang outlier. Apabila nilai memenuhi

akurasi maksimum dari masing-masing kualitas oleh Topex / Poseidon, Jason 1, Jason 2, dan Jason 3 maka akan dilanjutkan ke proses berikutnya. Apabila tidak memenuhi berarti perlu diulang kembali prosesnya untuk data yang *outlier*.

Tabel 1. Parameter Model Koreksi yang Digunakan

Parameter	T / P	Jason-1	Jason-2	Jason-3
DTC	ERA-	ERA-	ERA-	ERA-
	Interim	Interim	Interim	Interim
	DTC	DTC	DTC	DTC
WTC	ERA-	ERA-	ERA-	ERA-
	Interim	Interim	Interim	Interim
	WTC	WTC	WTC	WTC
Ionosfer	<i>smoothed dual frequency</i>	<i>smoothed dual frequency</i>	<i>smoothed dual frequency</i>	<i>smooth ed dual frequen cy</i>
SSB	CLS non-parametric	Tran2012 non-parametric	Tran2012 non-parametric	Tran2012 non-parametric
DAC	<i>local mean of MOG2D</i>	<i>local mean of MOG2D</i>	<i>local mean of MOG2D</i>	<i>local mean of MOG2D</i>
Tides	GOT4.10	GOT4.10	GOT4.10	GOT4.10
MSS	CNES-CLS11	CNES-CLS15	CNES-CLS15	CNES-CLS15

Sumber: Scharroo, RADS Data Manual 2016

4. *Intercalibrated*

Intercalibrated dilakukan dengan mengitung nilai bias pada cycle yang mengalami tandem misi. Bias ini dihitung menggunakan *least square adjustment* dari data yang overlap di dua satelit yaitu Topex / Poseidon dan Koreksi pada Jason 1, Jason 2, dan Jason 3 dihitung dengan rumus sebagai berikut (Masters, et.al., 2012):

$$\text{Corrected SLA (J1)} = \text{SLA (J1)} - \text{bias (J1, T/P)} \quad (4)$$

$$\text{Corrected SLA (J2)} = \text{SLA (J2)} - \text{bias (J2, J1)} - \text{bias (J1, T/P)} \quad (5)$$

$$\text{Corrected SLA (J3)} = \text{SLA (J3)} - \text{bias (J3, J2)} - \text{bias (J2, J1)} - \text{bias (J1, T/P)} \quad (6)$$

5. *Time Series Decomposition*

Metode dekomposisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah STL (*A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Regression*) yaitu dengan pendekatan *additive only*. Pendekatannya adalah sebagai berikut (Makridakis, et.al., 1998):

$$Y_t = S_t + T_t + E_T \quad (7)$$

dimana Y_t adalah data observasi, S_t adalah *seasonal*, T_t adalah *trend*, dan E_T adalah *remainder* atau *error*.

Tahap ini dilakukan untuk menguraikan *time series* ke dalam berbagai

komponen yaitu *seasonal*, *trend*, dan *remainder*. Metode ini menggunakan *iterative loess smoothing* untuk mendapatkan perkiraan tren dan kemudian *loess smoothing* lagi untuk mengekstrak komponen musiman aditif yang berubah. Penggunaan model ini dikarenakan STL memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap data observasi yang ekstrem (Dokumentov and Hyndman, 2015). Dekomposisi dikerjakan menggunakan program R sehingga didapatkan *trend* SLA.

6. *Tren Linier*

Trend yang dihasilkan dari STL *decomposition* selanjutnya dihitung *linier trendnya* menggunakan *ordinary least square* untuk kemudian didapatkan nilai kecepatan SLA dari nilai koefisien variabel x, yaitu variabel waktu [14].

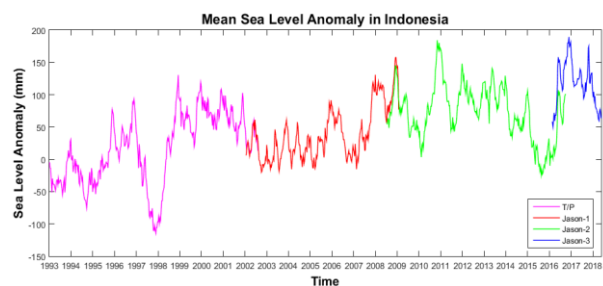
7. *Analisis Hasil*

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah menganalisis hasil pengolahan data yang telah diperoleh. Analisis terhadap tren kenaikan muka air laut yang dihasilkan dapat menggambarkan fenomena variabilitas permukaan laut di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sea Level Anomaly

Berdasarkan perhitungan SLA yang telah dilakukan, dengan model koreksi yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya, dihasilkan nilai rata-rata SLA per *cycle* di Indonesia yang ditunjukkan pada Gambar 2. SLA dari pengamatan Topex/Poseidon ditunjukkan dengan warna ungu, Jason 1 berwarna merah, Jason 2 berwarna hijau, dan Jason 3 berwarna biru.



Gambar 2. Grafik *Sea Level Anomaly*

Gambar 2 menunjukkan bahwa rata-rata sea level anomaly di Indonesia hasil pengamatan Topex/Poseidon berada dalam range -114,7 hingga 130,5 mm. Sedangkan hasil pengamatan Jason 1

berada dalam range -20,9 hingga 130,1 mm, Jason 2 berada dalam range -8.0 hingga 200,7 mm, dan Jason 3 berada dalam range 25,1 hingga 154,7 mm.

Berdasarkan Gambar 2 juga diketahui bahwa terjadi lompatan data pada *cycle* yang mengalami tandem. Oleh karena itu perlu dilakukan *intercalibrated* untuk menyatukan data Topex/Poseidon, Jason 1, Jason 2, dan Jason 3.

Intercalibrated

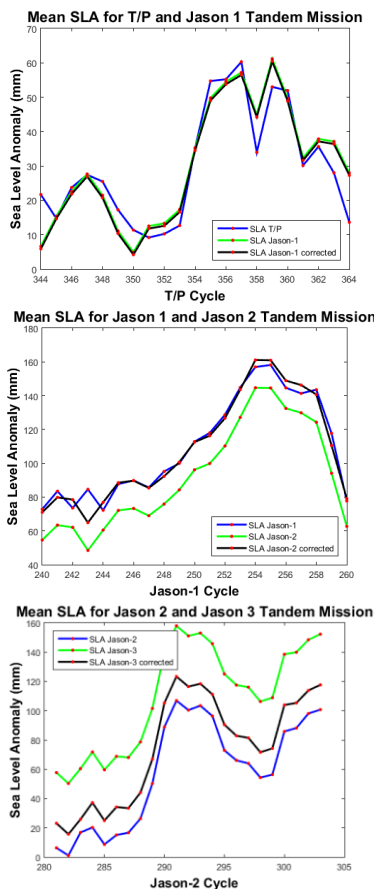
Berdasarkan perhitungan bias didapatkan nilai biasanya adalah sebagai berikut:

bias (J1, T/P) = 0,7 mm

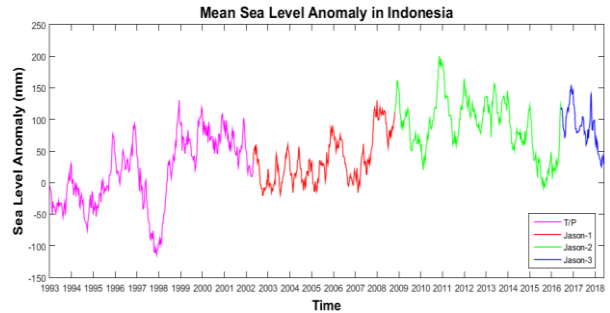
bias (J2, J1) = -17,1 mm

bias (J3, J2) = 51,1 mm

Hasil koreksi terhadap *cycle* yang mengalami tandem misi ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan lompatan data tandem misi, dimana garis warna biru adalah data referensi dan garis warna hijau adalah data yang harus dikoreksi. Sedangkan, warna hitam adalah data yang telah terkoreksi.



Gambar 3. Grafik *Tandem* Misi (1) T/P dan J1 (2) J1 dan J2 (3) J2 dan J3.

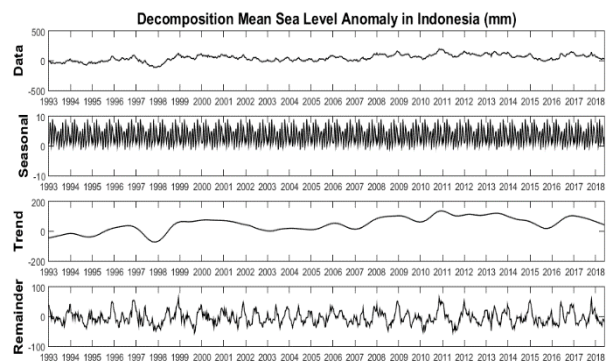


Gambar 4. Grafik *Sea Level Anomaly* Setelah *Intercalibrated*

Setelah dilakukan *intercalibrated*, nilai SLA dari Januari 1993 sampai Januari 2018 ditunjukkan pada Gambar 4. Dapat dilihat bahwa lompatan data sudah lebih smooth.

Time Series Decomposition

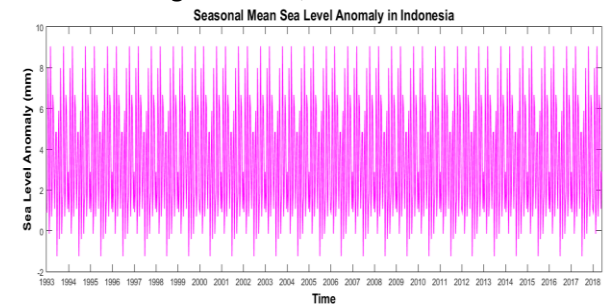
Setelah dilakukan STL decomposition di R, didapatkan grafik trend dan seasonal yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil *Time Series Decomposition*

Seasonal

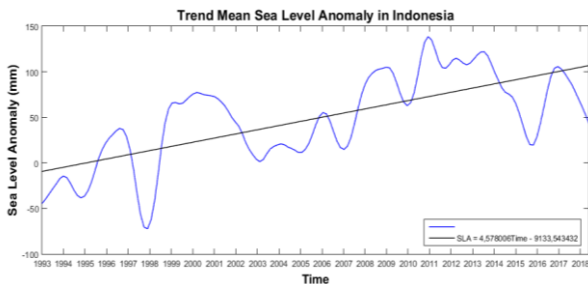
Setelah dilakukan STL decomposition didapatkan grafik seasonal yang ditunjukkan Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada setiap bulan Maret terjadi nilai sea level anomaly musiman dengan nilai 9,1mm, sedangkan pada setiap bulan Oktober terjadi nilai sea level anomaly musiman dengan nilai -1,3 mm.



Gambar. 6. Grafik *Seasonal Sea Level Anomaly*.

Trend

Hasil trend dari STL *decomposition* ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan *trend* diketahui bahwa nilai minimum SLA terjadi pada bulan November tahun 1997 yaitu -126,1 mm dan nilai SLA maksimum terjadi pada bulan November tahun 2010 yaitu 174,5 mm.



Gambar 7. Rata-rata *Sea Level Rise* Indonesia

Kemudian dihitung *tren linier* dari nilai *trend* tersebut sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$y = 4,6x - 9133,5 \quad (8)$$

Persamaan (8) menunjukkan persamaan dari tren linier yang menunjukkan tingkat nilai SLA terhadap waktu dengan y sebagai *sea level anomaly* dalam milimeter dan x sebagai variabel waktu dalam tahun. Dari Gambar 7 diketahui tren linier bernilai positif dari kemiringan garis ke arah kanan. Sehingga dari tren linier SLA didapat kecepatan *sea level rise* yang telah dihapus pola musimannya, yaitu dengan nilai 4,6 mm/tahun.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dari hasil pengolahan data altimetri menggunakan Topex/Poseidon dan Jason Series dengan menghapus sinyal periodik menggunakan *a seasonal-trend decomposition based on loess* dapat disimpulkan bahwa laju/kecepatan *sea level rise* di Indonesia adalah +4,6 mm/tahun. Nilai kecepatan positif ini menunjukkan bahwa *sea level* di Indonesia akan terus naik, sehingga diprediksi akan terjadi penenggelaman di beberapa kawasan di Indonesia. Oleh karena itu, perlu dilakukannya perencanaan penanggulangan sebelum terjadinya bencana tersebut.

Saran dari penulis mengenai keberlanjutan penelitian adalah penggunaan data time-series yang lebih panjang diperkirakan dapat meningkatkan

akurasi dari hasil estimasi ke depannya. Selain itu, pembatasan wilayah yang lebih spesifik dapat memperkirakan rata-rata kenaikan muka air laut di Indonesia yang lebih mencerminkan keadaan laut di Indonesia. Penggunaan data stasiun pasang surut juga mampu meningkatkan ketelitian data di daerah yang sangat dekat dengan daratan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada TUDelft, EUMETSAT, dan NOAA selaku pihak pengelola RADS (*Radar Altimetry Database System*) sebagai sumber data yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Nicholls, R. J. "Impact of and responses to sea-level rise." *Understanding Sea-Level Rise and Variability*, 2010: 17-44.
- McGranahan, G., D. Balk, and B. Anderson. "The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones." *Environ. Urban*, 2007: 17-37.
- Dahuri, R., J. Rais, S. P. Ginting, and M. J. Sitepu. *Pengelolaan Sumber Daya Pesisir dan Lautan secara Terpadu*. Jakarta: Balai Pustaka, 2008.
- Church, J. A., and N. J. White. "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century." *Surv. Geophys*, 2011: 585-602.
- Woppelmann, G., and M. Marcos. "Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability." *Rev. Geophys*, 2016: 64-92.
- Nerem, R. S., D. P. Chambers, C. Choe, and G. T. Mitchum. "Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions." *Marine Geodesy*, 2010: 435-446.
- Fenoglio-Marc, L., T. Schone, J. Illigner, M. Becker, P. Manurung, and Khafid. "Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region." *Marine Geodesy*, 2010: 137-150.
- Andersen, O. B. "The DTU10 gravity field and mean sea surface." *Second international symposium of the gravity field of the Earth (IGFS2)*. Alaska: Fairbanks, 2010.
- Scharroo, R. *RADS Data Manual*. Netherlands: TUDelft, Handoko, E. Y., M. J. Fernandes, and C. Lazaro. "Assessment of Altimetric Range and Geophysical Corrections and Mean Sea Surface Models-Impacts on Sea Level Variability around Indonesia Seas." *Remote Sens*, 2017: 102.
- Masters, D., et al. "Comparison of Global Mean Sea Level Time Series from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2." *Marine Geodesy*, 2012: 20-41.

Makridakis, S., S. C. Wheelwright, and R. J. Hyndman. Forecasting: Methods and Applications. United States of America: John Wiley & Sons, 1998.

Dokumentov, A., and R. J. Hyndman. STR: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Regression. Australia: Department of Econometrics and Business Statistics, Monash University, 2015.