

***Steric And Eustatic Effect Contributions To Sea Level Change
Based On Altimetry Satellite Argo And Grace Satellite Data Within
1992-2012 Period
(The Study Area: The Western Pacific Ocean)***

**Kontribusi Efek Eustatik Dan Sterik Terhadap Perubahan Muka
Air Laut Berdasarkan Data Satelit Altimetri Data Argo Dan Data
Satelit Grace Pada Periode 1992-2012
(Wilayah Studi: Samudera Pasifik Bagian Barat)**

Prayudha Hartanto, Sella Lestari Nurmaulia, Kosasih Prijatna

Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB), ITB,
Bandung, Indonesia, KK Sains dan Rekayasa Hidrografi, FITB ITB, Bandung, Indonesia,
KK Geodesi, FITB ITB, Bandung, Indonesia

Abstract. *The change of sea level in the western Pasific Ocean is one of the biggest change in the world. This is caused by steric and eustatic factors. In the period of 1992-2012, the total change of sea level in this area based on the Topex/Poseidon satellite data, Jason 1 and Jason 2, was 6.982 ± 3.493 mm/year. Based on the temperature and salinity from Argo floats for the period 2000 – 2013, the obtained high steric changes in sea level in the region is about 14.352 ± 13.002 mm/year. The result is a based on high steric sea level relative to 900 dbar pressure. To find the rise of eustatic sea level that caused by the changes in ocean mass, linear regression performed on the data Equivalent Water Thickness (EWT) of monthly GRACE satellites in the period January 2004 to April 2013. The magnitude of the linear trend EWT changes in this area is -0.4026 ± 0.1073 mm/year. This study concludes that the correlation between EWT and the SLA value is more significant than the correlation between high steric sea level and SLA. But further investigation is needed to determine the factor that contributes more to changes of sea level in the study area. This occurs due to the presence of still considerable correlation between the high steric sea level and ocean mass which is the independent variable in the equation of total sea level. To minimize these correlations, observations required high steric and ocean mass with a longer time span.*

Keywords : *The change of sea level, steric, eustatic, the western Pasific Ocean, linear trend*

Abstrak. Perubahan muka laut di wilayah Samudera Pasifik bagian barat merupakan salah satu yang terbesar di dunia. Hal ini disebabkan oleh faktor sterik dan eustatik. Dalam kurun waktu 1992-2012, perubahan muka laut total di area ini berdasarkan data satelit Topex/Poseidon, Jason 1 dan Jason 2 adalah $6,982 \pm 3,493$ mm/tahun Berdasarkan profil temperatur dan salinitas dari pelampung Argo untuk kurun waktu 2000-2013, diperoleh perubahan tinggi sterik muka air laut di wilayah ini sebesar $14,352 \pm 13.002$ mm/tahun. Hasil ini merupakan tinggi sterik muka air laut relatif terhadap tekanan 900 dBar. Untuk mengetahui kenaikan muka laut eustatik yang disebabkan oleh perubahan massa lautan, dilakukan regresi linier terhadap data *Equivalent Water Thickness* (EWT) bulanan dari satelit GRACE pada periode Januari 2004 hingga April 2013. Besarnya tren linier perubahan EWT di area ini adalah $-0,4026 \pm 0,1073$ mm/tahun. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa korelasi antara EWT dan nilai SLA lebih signifikan dibanding korelasi antara tinggi sterik muka laut dan SLA. Namun diperlukan penyelidikan lebih lanjut untuk menentukan faktor mana yang lebih berkontribusi terhadap perubahan muka laut di area penelitian ini. Hal ini terjadi akibat masih terdapatnya korelasi yang cukup besar antara tinggi sterik muka laut dan massa lautan yang merupakan variabel bebas dalam persamaan tinggi muka laut total. Untuk

memperkecil korelasi tersebut, diperlukan pengamatan tinggi sterik dan massa lautan dengan rentang waktu yang lebih panjang.

Kata kunci : *Perubahan muka laut, sterik, eustatik, Samudera Pasifik Barat, tren linier*

1. Pendahuluan

Perubahan muka air laut merupakan salah satu konsekuensi penting dari pemanasan global (Llovel dkk, 2010). Pada periode 2003-2009 kenaikan muka laut global mencapai $2,6 \pm 0,4$ mm/tahun (Ablain dkk, 2009). Pada rentang waktu ini, pengaruh efek sterik (*ekspansi thermal*) pada perubahan muka laut, yang diperoleh berdasarkan data suhu dan salinitas lautan dari program Argo, berkisar antara $-0,5 \pm 0,5$ mm/tahun (Willis dkk, 2008) hingga $0,8 \pm 0,8$ mm/tahun (Leuliette & Miller, 2009).

Hal tersebut mengindikasikan bahwa pengaruh lelehan es semakin meningkat dalam perubahan muka laut global (Llovel dkk, 2010), tidak seperti pada dekade sebelumnya (1993-2003) di mana 50 persen dari kenaikan muka laut dipengaruhi oleh ekspansi thermal lautan dan 40 persen dari lelehan es daratan (Bindoff dkk, 2007).

Pada penelitian ini akan diteliti faktor manakah yang menjadi penyebab utama kenaikan muka laut di wilayah Pasifik bagian Barat. Untuk menentukan faktor penyebab kenaikan muka laut regional Pasifik Barat digunakanlah data satelit altimetri Topex/Poseidon, Jason-1, dan Jason-2 sebagai data utama (menentukan laju kenaikan muka laut total), data suhu dan salinitas dari program Argo (menentukan pengaruh ekspansi thermal lautan), dan data satelit GRACE (menentukan perubahan massa lautan akibat pelelehan es di kutub).

Data-data tersebut panjangnya bervariasi bergantung pada ketersediaan data, yaitu untuk data altimetri digunakan data pada periode 1992-2012, data Argo pada periode 2000-2013 dan data GRACE pada periode 2003-2012. Ketiga data berbeda tersebut dihubungkan dalam satu persamaan perubahan muka laut, yakni sebagai berikut (Llovel dkk, 2010):

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{sterik} + \Delta H_{massa\ lautan} \quad (1)$$

dengan ΔH_{total} merupakan perubahan muka laut total berdasarkan data altimetri, ΔH_{sterik} merupakan komponen sterik dari perubahan muka laut (perubahan permukaan muka laut akibat perubahan suhu dan salinitas air laut) yang diperoleh dari data Argo, dan $\Delta H_{massa\ lautan}$ adalah perubahan muka laut akibat penambahan massa air (massa air laut bertambah akibat melelehnya es di kutub) yang diperoleh dari data gravimetri GRACE.

Samudera Pasifik bagian barat dipilih sebagai area penelitian karena area ini merupakan salah satu area di mana laju kenaikan muka lautnya mencapai 3 kali lebih besar daripada laju rerata kenaikan muka laut global (Cazenave & Llovel, 2010). Bahkan pada penelitian terdahulu, Cazenave dan Nerem (2004) menyebutkan bahwa Samudera Pasifik bagian barat dan Samudera Hindia bagian timur memiliki nilai terbesar dalam kenaikan muka laut. Penyebab utama dari besarnya nilai kenaikan muka laut di Samudera Pasifik bagian barat adalah ekspansi thermal (Church dkk, 2001). Wilayah ini juga menunjukkan efek yang berlawanan antara perubahan suhu dengan perubahan salinitas pada tren perubahan muka laut (Cazenave dan Llovel, 2010, Wunsch dkk, 2007).

Berdasarkan penjabaran di atas, permasalahan-permasalahan yang akan diungkapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar perubahan muka laut di Samudera Pasifik bagian barat pada periode 1992-2012,
2. Faktor manakah yang memiliki kontribusi lebih besar dalam perubahan muka laut tersebut, apakah efek sterik atau efek eustatik.

2. Metode dan Data yang Digunakan

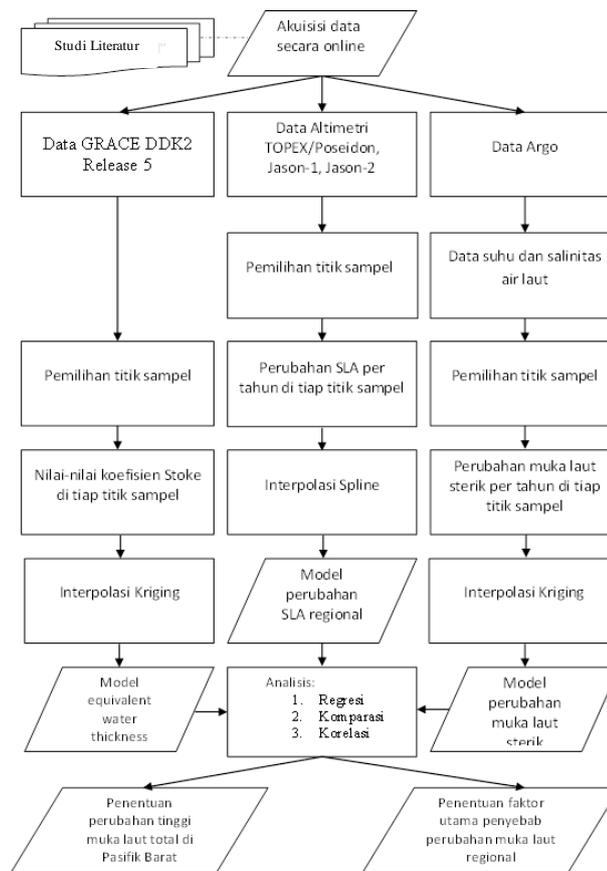
2.1 Metodologi

Untuk menjawab dua permasalahan utama tersebut, peneliti menggunakan kombinasi data satelit altimetri, satelit GRACE dan data Argo. Penggunaan ketiga jenis data tersebut dimaksudkan agar diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai fenomena perubahan muka laut yang sedang terjadi di area penelitian. Sebagaimana diketahui, perubahan muka laut dipengaruhi oleh adanya penambahan massa air laut dari air tawar (contoh: mencairnya es di Kutub Bumi) dan adanya ekspansi termal lautan, atau yang dikenal sebagai efek sterik perubahan muka laut.

Dalam hal perubahan muka laut yang dipengaruhi oleh penambahan massa air, maka dapat dideteksi dari adanya perubahan *Equivalent Water Thickness* (EWT). EWT adalah ketebalan lapisan air permukaan sebagai akibat dari perubahan cadangan air pada reservoir-reservoir hidrologis, arus pergerakan samudera, perubahan massa atmosfer dan kriosfer, dan pertukaran massa di antara reservoir-reservoir tersebut (<http://grace.jpl.nasa.gov>.) Untuk mengetahui perubahan EWT tersebut digunakan data satelit gravimetri GRACE. Di lain pihak, untuk mengetahui efek sterik perubahan muka laut digunakan hasil pengamatan *in-situ* dari program Argo. Sedangkan untuk memperoleh perubahan muka laut total digunakan data SLA dari satelit altimetri.

Pada tiap-tiap jenis data tersebut dipilih sejumlah titik sampel yang mewakili keseluruhan area penelitian, untuk kemudian ditentukan nilai perubahan masing-masing parameter yang sesuai dalam satuan milimeter per tahun. Selanjutnya dilakukan interpolasi untuk setiap jenis data sehingga didapatkan model perubahan (baik perubahan muka laut, geoid, maupun muka laut sterik) yang kontinyu secara spasial. Dari model-model yang diperoleh tersebut akan ditentukan faktor yang lebih dominan dalam perubahan muka laut di Pasifik Barat dengan menggunakan persamaan (1).

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai prosedur penelitian, berikut ditampilkan diagram alir penelitian ini dalam Gambar 1.



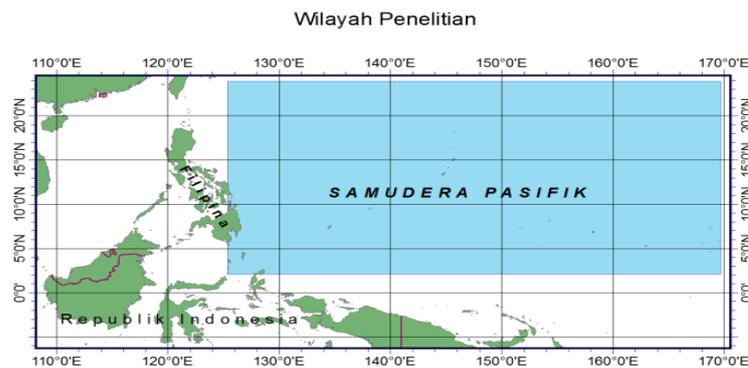
Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Data Satelit Altimetri

Data satelit altimetri yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pengamatan satelit Topex/Poseidon, Jason 1 dan Jason 2 dengan rentang waktu 1992 hingga 2012. Data-data tersebut diunduh dari situs web RADS (*Radar Altimeter Database System*, <http://rads.tudelft.nl/rads/data/radsdata1.cgi>), dengan resolusi temporal 10 hari (1 *cycle*). Perlu diketahui bahwa situs web akuisisi data RADS menyediakan beragam pilihan jenis data yang dapat diunduh, sehingga dalam penelitian ini dibatasi hanya menggunakan data SLA dengan koreksi standar RADS. SLA atau *Sea Level Anomaly* merupakan tinggi permukaan laut di atas permukaan geofisik di mana efek dinamisnya seperti pasut laut dan pengaruh tekanan atmosfer sudah dihilangkan (Rohman, 2010). Dalam penelitian ini, SLA yang digunakan menggunakan model muka laut rata-rata global DTU 10 sebagai bidang referensinya. Selain itu koreksi pasut samudera dan pasut atmosfer (*inverted barometer, IB*) juga diterapkan pada SLA yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk koreksi pasut samudera (ocean tide) digunakan model GOT 4.8 sedangkan untuk koreksi IB digunakan MOG2D total.

Data SLA yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai-nilai SLA yang berada dalam batas-batas area penelitian (Gambar 2), yaitu $125,4^{\circ}$ BT- $169,7^{\circ}$ BT dan $2,1^{\circ}$ LU- $23,9^{\circ}$ LU. Selanjutnya, dipilih titik sampel yang berada pada *crossover* (perpotongan pass naik dan pass turun) satelit altimetri. Dalam pemilihan titik sampel, faktor-faktor seperti jarak titik ke daratan dan kedalaman dasar laut turut diperhatikan. Keberadaan daratan di sekitar

lokasi pengamatan altimetri mengurangi kualitas koreksi geofisis, orbit dan instrumen satelit sehingga kualitas data yang dihasilkan pun berkurang (Hartanto, 2012). Berdasarkan pertimbangan tersebut, dipilih titik-titik sampel yang memiliki jarak lebih dari 15 km dari daratan terdekat dan memiliki kedalaman dasar laut setidaknya 200 meter. Jumlah titik sampel yang digunakan adalah 70 titik yang terdistribusi secara merata di seluruh area penelitian, dengan panjang deret waktu berkisar 720 cycle (20 tahun, dari 1992-2012).



Gambar 2. Wilayah penelitian, ditandai dengan kotak berwarna biru

2.3 Data Argo

Dalam penelitian ini, data profil Argo, khususnya data suhu dan salinitas diakses dari situs <http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection>. Situs ini menyediakan data profil Argo yang telah diolah oleh beberapa pusat akuisisi data (Data Acquisition Centers) yang ada di dunia, seperti AOML, Coriolis dan JMA. Antarmuka dalam situs ini memungkinkan pengguna untuk memilih berbagai parameter data yang akan diakses sesuai keperluan. Untuk penelitian ini, parameter-parameter yang digunakan adalah salinitas dan suhu dengan kualitas baik pada semua tahap pengolahan.

Data yang diunduh memiliki rentang waktu yang berbeda. Dari 94 titik sampel yang digunakan, 60 diantaranya berada pada rentang 1 Januari 2000 hingga 19 Mei 2013, sedangkan sisanya pada rentang 1 Januari 2009 – 13 Juni 2013. Titik-titik sampel yang digunakan adalah profil Argo dengan periode pengamatan lebih dari 108 *cycle* (dengan panjang 1 *cycle* adalah 10 hari).

Dari data-data suhu dan salinitas tersebut, selanjutnya ditentukan tinggi dinamik menggunakan algoritma TEOS-10 (*Thermodynamic Equation of Seawater-2010*) berdasarkan tekanan acuan tertentu. Tekanan acuan yang dipilih 0 desibar dan 900 desibar. Dari tahap ini diperoleh tinggi dinamik untuk tekanan 0 dBar dan 900 dBar, yang keduanya kemudian diselisihkan untuk memperoleh anomali tinggi dinamik. Tahap terakhir adalah menghitung tinggi sterik untuk setiap *cycle* berdasarkan persamaan (IOC, SCOR, & IAPSO, 2010):

$$H_{sterik} = \frac{\Delta H_{dinamik}}{9,7963 \text{ m/s}^2} \quad (2)$$

2.4 Data GRACE

Pada penelitian ini digunakan data gaya berat GRACE level 2 hasil pengolahan institusi GFZ Jerman yang terbaru (*Release 05*). Data GRACE level 2 ini memiliki derajat dan orde maksimal 90 tanpa pembatas statistik (*statistical constraints*). Data yang digunakan untuk menentukan perubahan tinggi muka laut eustatik berada pada rentang Januari 2004 hingga April 2013.

Tren perubahan muka laut eustatik diperoleh dari nilai Equivalent Water Thickness (EWT) bulanan. EWT adalah ketebalan lapisan air permukaan sebagai akibat dari perubahan cadangan air pada reservoir-reservoir hidrologis, arus pergerakan samudera, perubahan massa atmosfer dan kriosfer, dan pertukaran massa di antara reservoir-reservoir tersebut (<http://grace.jpl.nasa.gov>). Untuk memperoleh nilai EWT bulanan, langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan anomali koefisien harmonik bola ΔC_{lm} dan ΔS_{lm} . Nilai-nilai anomali tersebut diperoleh dengan menyelisihkan nilai-nilai koefisien harmonik bola C_{lm} dan S_{lm} bulanan (merupakan data mentah dari Satelit GRACE) dengan rerata deret waktu koefisien-koefisien tersebut. Nilai l dan m merupakan derajat dan orde koefisien harmonik bola. Langkah berikutnya adalah menentukan fungsi-fungsi Legendre ternormalisasi untuk tiap-tiap koefisien harmonik bola. Langkah-langkah penentuan EWT ini kemudian dihubungkan dalam suatu persamaan sebagai berikut (Wahr dkk., 1998):

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ave}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)) \quad (3)$$

Nilai a adalah rerata jari-jari bumi di khatulistiwa (6371 km), ρ_{ave} adalah densitas rerata bumi, yang diperoleh dari rasio antara densitas rerata bumi (5517 kg/m^3) dan densitas massa air (1000 kg/m^3). Simbol θ dan ϕ secara berurutan adalah lintang dan bujur geodetik titik pengamatan, sedangkan k_l adalah bilangan Love untuk tiap-tiap derajat koefisien harmonik bola. Bilangan Love yang digunakan adalah bilangan Love hasil perhitungan Han dan Wahr (1995). Bilangan Love hasil perhitungan Han dan Wahr ini hanya tersedia untuk beberapa derajat saja, sehingga untuk memperoleh nilai-nilai pada derajat yang tak tercantum digunakan interpolasi spline. Bilangan Love hasil perhitungan Han dan Wahr tercantum pada Tabel 1.

Tahap selanjutnya adalah memilih sejumlah titik sampel yang terletak dalam area penelitian untuk dibuat tren liniernya. Dalam penelitian ini dipilih 106 titik sampel yang tersebar merata di area penelitian sebagaimana tampak dalam Gambar 3. Nilai-nilai undulasi geoid bulanan di seluruh titik sampel disusun ke dalam deret waktu dengan rentang 108 bulan (Januari 2004 – April 2013). Dalam pembentukan deret waktu ini perlu diperhatikan bulan-bulan di mana tidak terdapat data pengukuran GRACE. Bulan-bulan tersebut adalah: Januari 2004; Januari dan Juni 2011; Mei, Oktober, November, Desember 2012. Untuk mengatasi masalah ini, data-data pada bulan-bulan tersebut di atas dianggap sebagai NaN (*Not a Number*).

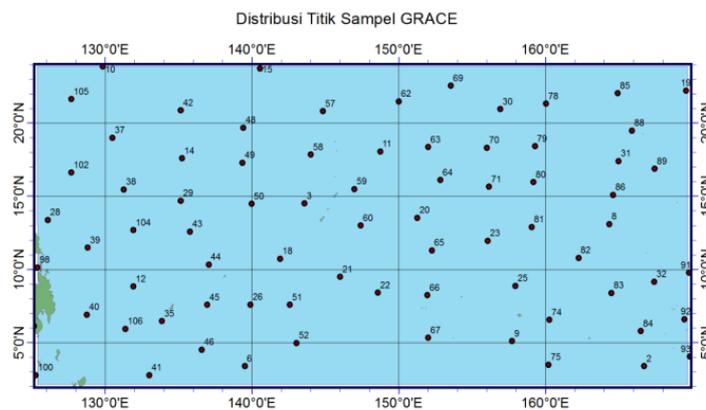
Tabel 1. Bilangan Love Hasil Perhitungan Han dan Wahr untuk model bumi PREM

L	k_l
0	0
1	0.027
2	-0.303
3	-0.194
4	-0.132
5	-0.104
6	-0.089
7	-0.081
8	-0.076
9	-0.072
10	-0.069
12	-0.064
15	-0.058
20	-0.051
30	-0.04
40	-0.033
50	-0.027
70	-0.02
100	-0.014

Setelah disusun dalam deret waktu, tren linier ditentukan dengan regresi linier variabel tunggal dengan persamaan berikut:

$$H = at + b \tag{4}$$

dengan H adalah nilai tinggi muka laut di suatu titik, a adalah koefisien regresi (tren linier) dan b adalah nilai H pada t=0.



Gambar 3. Distribusi Titik Sampel GRACE

3. Hasil-Hasil Penelitian

Pada Gambar 4a berikut tampak variasi spasial perubahan SLA yang diperoleh dari data altimetri. Perubahan SLA tersebut diperoleh dari regresi linier terhadap data deret waktu SLA dari tanggal 3 Oktober 1992 hingga 3 Maret 2013. Berdasarkan seluruh sampel penelitian, nilai perubahan SLA bervariasi dari -0,758 hingga 12,936 mm/tahun. Nilai perubahan SLA tertinggi berada di sekitar titik sampel 14, 30, 41, 42, 51, 52, 53 dan 59. Jika dirata-ratakan, maka nilai perubahan SLA di area penelitian adalah 6,982 mm/tahun dengan standar deviasi 3,493 mm/tahun. Plot ini menunjukkan pola yang berbentuk seperti 'perbukitan', di mana lereng hingga puncak perbukitan berada pada lintang 5° hingga 15° LU.

Pada area penelitian dengan latitude lebih besar dari 20° LU, terdapat fenomena penurunan muka air laut. Hal ini disebabkan adanya Pacific Decadal Oscillation (PDO). PDO adalah fenomena yang terjadi pada area cekungan di lintang tersebut, yang terdiri dari dua fase, yang masing-masing berlangsung selama 20 hingga 30 tahun. Pada PDO fase positif (hangat), suhu permukaan air di Pasifik bagian barat cenderung rendah (dingin). Sedangkan suhu muka laut di perairan khatulistiwa Pasifik Tengah dan Timur cenderung tinggi. Pada fase negatif pola yang berlawanan terjadi. Saat ini PDO tengah berada pada fase negatif, sehingga suhu air laut di wilayah Pasifik bagian Barat cenderung tinggi, yang mengakibatkan tingginya laju kenaikan muka laut di area ini. Namun, untuk perairan Pasifik di atas lintang 20° LU yang membentang dari perairan Filipina hingga Alaska, suhu muka laut berada di bawah rata-rata global. Hal ini yang menyebabkan munculnya pola berwarna biru tua (laju perubahan muka laut bernilai negatif) di sebelah utara daerah penelitian.

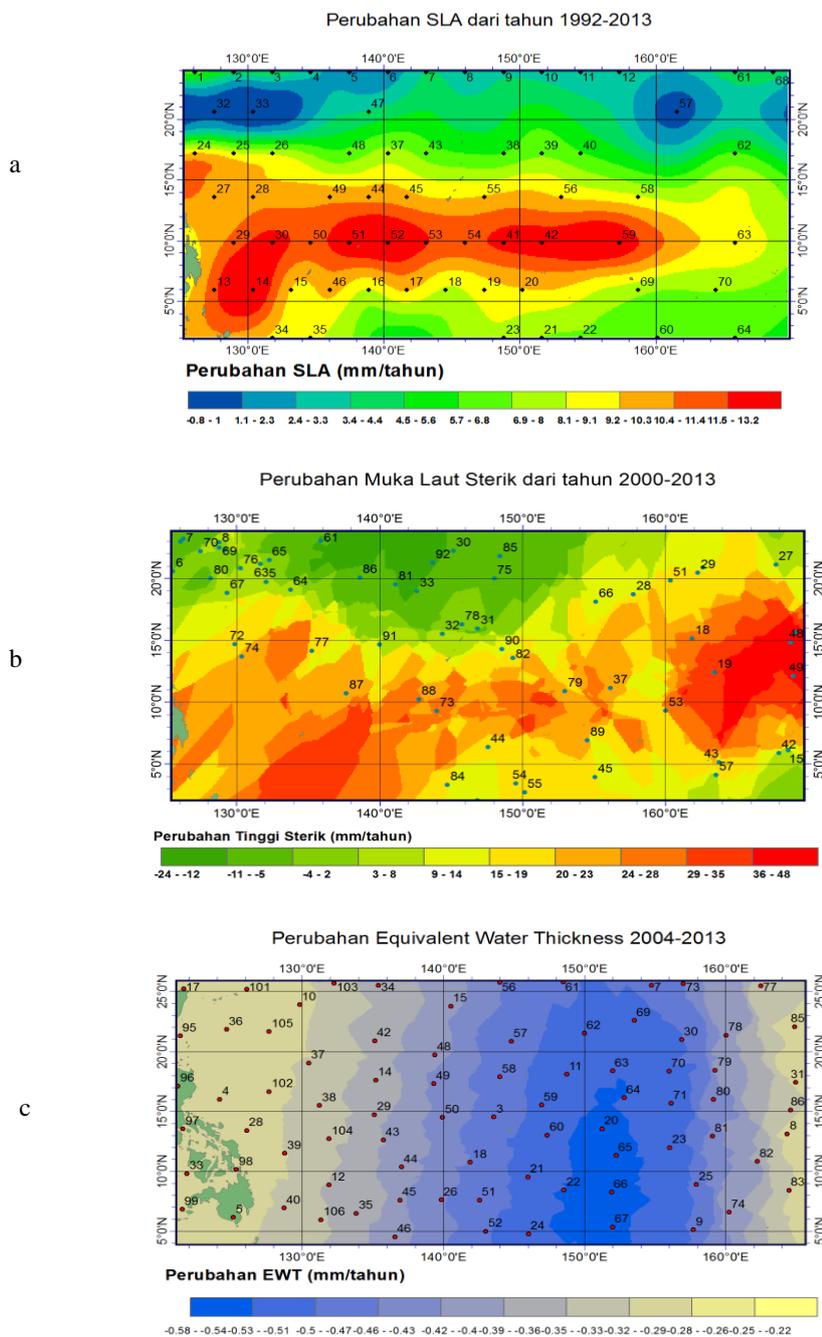
Perubahan muka laut sterik di area penelitian menunjukkan pola yang hampir sama dengan perubahan SLA dari data satelit altimetri. Sebagaimana telah disinggung sebelumnya, perubahan muka laut sterik diperoleh dari data suhu dan salinitas dari program Argo. Dalam penelitian ini, tinggi muka laut sterik yang ditampilkan adalah tinggi muka laut akibat efek sterik total, yakni suhu dan salinitas air laut. Dengan kata lain, kedua faktor tersebut tidak diteliti kontribusinya secara terpisah, melainkan sebagai satu kesatuan.

Tampak bahwa plot variasi spasial perubahan tinggi sterik muka laut membentuk perbukitan sebagaimana pada data altimetri. Wilayah punggung dari perbukitan ini juga memanjang pada lintang 5° - 15° LU, di mana perubahan tertinggi terjadi di sekitar titik sampel 48. Nilai rerata perubahan tinggi sterik di area penelitian adalah 14,352 mm/tahun dengan standar deviasi 13,002 mm/tahun.

Untuk mengetahui kontribusi efek eustatik pada perubahan muka laut di area penelitian, perlu digambarkan variasi spasial perubahan EWT dari data GRACE. Dalam penelitian ini dipilih titik sampel pengamatan GRACE sebanyak 96 titik yang tersebar merata di seluruh area penelitian. Titik-titik tersebut memiliki nilai perubahan EWT yang diperoleh dari analisis regresi terhadap data deret waktu EWT sepanjang 8 tahun dari tahun 2004 hingga 2013.

Berbeda dengan variasi perubahan SLA dari data altimetri dan variasi perubahan tinggi sterik dari data Argo, variasi perubahan EWT tidak menampilkan pola perbukitan

(Gambar 4.c), namun menunjukkan pola cekungan di sepanjang bujur $\pm 150^\circ$ BT. Seluruh titik sampel menunjukkan tren negatif dalam perubahan EWT. Hal ini mengindikasikan turunnya kontribusi efek eustatik dalam kurun waktu tersebut di area penelitian.



Gambar 4. a) Perubahan SLA dari Tahun 1992-2013, b) Perubahan Tinggi Muka Laut Sterik Tahun 2000-2013, c) Perubahan massa lautan dari data satelit GRACE tahun 2004-2012

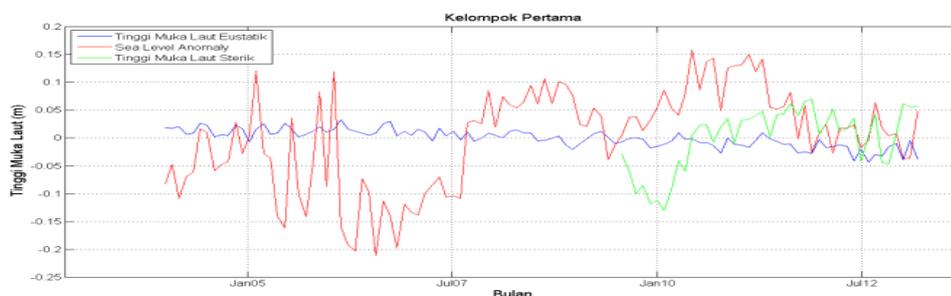
4. Analisis

Untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan perubahan SLA, perubahan muka laut sterik maupun perubahan undulasi geoid di area penelitian, berikut disajikan grafik-grafik deret waktu dari sejumlah titik sampel. Grafik-grafik tersebut dikelompokkan ke dalam dua kelompok yang mewakili titik-titik sampel altimetri, Argo dan GRACE yang berdekatan. Hal ini dilakukan mengingat lokasi titik sampel untuk tiap jenis data tidaklah sama, sehingga perlu diasumsikan bahwa sampel dari ketiga jenis data yang memiliki lokasi yang relatif dekat merepresentasikan kondisi lingkungan yang serupa.

4.1 Kelompok Pertama

Kelompok pertama adalah titik sampel altimetri nomor 53, sampel Argo nomor 88 dan sampel GRACE nomor 18. Kelompok ini berada pada sekitar lintang 10° LU. Nilai tren linier perubahan SLA di titik sampel altimetri 53 adalah $-0,7511$ mm/tahun pada rentang waktu Agustus 2009 hingga Maret 2013. Pada Gambar 5 berikut tampak bahwa nilai SLA maksimum terjadi pada bulan Juni 2010.

Sedangkan dari sampel data Argo 88, yang lokasinya berdekatan dengan titik sampel altimetri 53, diperoleh laju perubahan muka laut sterik sebesar $1,0165$ mm/tahun. Tampak dari Gambar 5 tinggi muka laut sterik terendah di titik ini terjadi pada bulan Maret 2010. Hal ini tidak sesuai dengan variasi temporal SLA di titik 53, di mana pada bulan tersebut nilai SLA mengalami peningkatan sebesar 32 mm dari bulan sebelumnya. Untuk data GRACE, titik sampel 18 mengalami perubahan EWT sebesar $-0,6834$ mm/tahun.



Gambar 5. Grafik deret waktu di kelompok pertama, garis merah merupakan deret waktu SLA dari altimetri, garis biru adalah muka laut eustatik dari GRACE dan garis hijau adalah tinggi muka laut sterik dari Argo

Jika nilai-nilai perubahan SLA, perubahan muka laut sterik dan perubahan undulasi geoid di atas dimasukkan ke dalam persamaan 1, maka diperoleh ketidaksesuaian. Hal ini diduga disebabkan oleh pengolahan tinggi muka laut sterik yang tidak menyertakan kontribusi laut dalam, dimana tekanan acuan yang digunakan hanya mencapai 900 dBar, sedangkan secara teoritis seharusnya hingga 2000 dBar yaitu tekanan di mana terdapat kondisi statika partikel. Nilai perubahan tinggi sterik hasil perhitungan menggunakan persamaan 1 di titik 88 adalah $-0,0677$ mm/tahun, atau berselisih 1.0842 mm/tahun dengan data hasil pengamatan Argo. Nilai-nilai korelasi antar variabel dalam kelompok pertama ini ditampilkan dalam tabel 2.

Tabel 2. Matriks koefisien korelasi antar parameter pada Kelompok 1

	SLA dari Altimetri	Tinggi sterik dari Argo	EWT dari GRACE
SLA dari Altimetri	1	0.031303118	0.382731368
Tinggi sterik dari Argo	0.031303118	1	-0.27509021
EWT dari GRACE	0.382731368	-0.27509021	1

Untuk menguji signifikansi korelasi antar parameter digunakan matriks p, di mana setiap nilai p adalah peluang munculnya nilai korelasi sebesar nilai-nilai pengamatan secara acak, di mana korelasi sejati bernilai nol. Jika nilai p kecil (kurang dari 0,05), maka korelasi antar parameter yang bersangkutan signifikan. Matriks p untuk kelompok pertama ditampilkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Matriks p untuk Kelompok 1

	SLA dari Altimetri	Tinggi sterik dari Argo	EWT dari GRACE
SLA dari Altimetri	1	0.842052838	0.011307527
Tinggi sterik dari Argo	0.842052838	1	0.0742037939
EWT dari GRACE	0.011307527	0.0742037939	1

Dari Tabel 3, nilai korelasi antar parameter paling signifikan adalah korelasi antara SLA dengan EWT dari GRACE. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang waktu Agustus 2009 hingga Maret 2013 kontribusi efek eustatik lebih signifikan daripada kontribusi efek sterik. Korelasi antara tinggi sterik dengan SLA jauh lebih kecil daripada korelasi antara tinggi eustatik dan SLA, hal ini mengindikasikan bahwa pada 4 tahun terakhir pelelehan massa es daratan meningkat sehingga kontribusinya terhadap perubahan tinggi muka laut regional juga meningkat. Nilai korelasi yang positif menunjukkan bahwa kedua parameter ini memiliki fase yang sama walaupun signifikansinya lebih kecil daripada kontribusi efek eustatik. Fenomena yang juga tampak dari Tabel 2 dan 3 adalah adanya korelasi yang signifikan antara dua variabel bebas, yaitu tinggi sterik dan perubahan massa lautan. Penyebab adanya korelasi tersebut adalah data deret waktu yang kurang panjang. Fenomena yang juga tampak dari Tabel 2 dan 3 adalah adanya korelasi yang signifikan antara dua variabel bebas, yaitu tinggi sterik dan perubahan massa lautan. Penyebab adanya korelasi tersebut adalah data deret waktu yang kurang panjang.

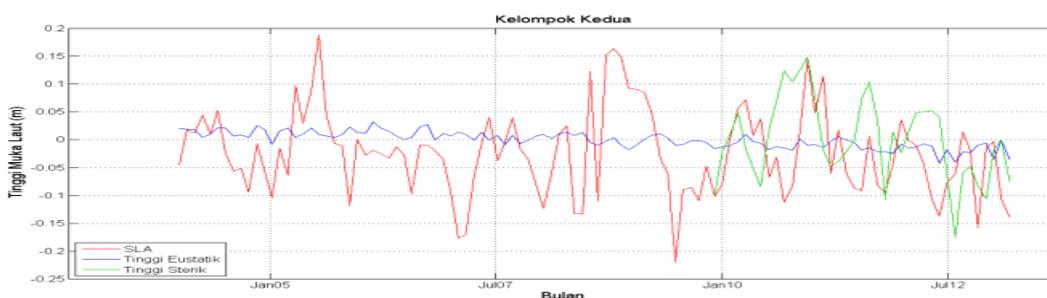
Secara visual sebagaimana tampak dalam Gambar 4.4, deret waktu muka laut sterik membentuk gelombang yang serupa dengan plot deret waktu SLA, kecuali pada bulan Oktober 2009 hingga April 2010. Hal ini disebabkan oleh adanya siklus tahunan dalam

perubahan kadar salinitas air laut. Sedangkan pada perubahan massa lautan, siklus musiman berpengaruh lebih besar daripada siklus tahunan.

4.2 Kelompok Kedua

Kelompok kedua adalah titik sampel altimetri 47, titik sampel Argo 86 dan titik sampel GRACE 48. Kelompok ini berada pada sekitar lintang 20° LU. Laju perubahan nilai SLA di titik sampel altimetri 47 adalah $-0,7708$ mm/tahun. Nilai SLA tertinggi terjadi pada bulan Desember 2010.

Untuk titik sampel Argo 86 diperoleh perubahan tinggi muka laut sterik sebesar $-0,7198$ mm/tahun. Nilai tertinggi muka laut sterik di titik ini juga terjadi pada bulan Desember 2010. Sedangkan untuk titik sampel GRACE 48, diperoleh perubahan EWT sebesar $-0,5135$ mm/tahun. Dengan menggunakan persamaan 1, diperoleh ketidak sesuaian antara perubahan tinggi sterik hasil pengolahan data dan perubahan SLA dikurangi dengan perubahan EWT. Nilai perubahan tinggi sterik hasil perhitungan menggunakan persamaan 1 adalah $-0,2573$ mm/tahun. Hasil ini berselisih $0,4625$ mm/tahun dengan nilai perubahan tinggi sterik hasil pengamatan Argo di titik sampel 86.



Gambar 6. Grafik deret waktu di kelompok kedua, garis merah merupakan deret waktu SLA dari altimetri, garis biru adalah muka laut eustatik dari GRACE dan garis hijau adalah tinggi muka laut sterik dari Argo

Nilai korelasi antar parameter dan nilai p untuk kelompok 2 ditampilkan dalam Tabel 4 dan Tabel 5. Nilai korelasi antar parameter yang paling signifikan dalam kelompok 2 adalah korelasi antara nilai SLA dan EWT, yang ditunjukkan dengan nilai p 0,01434 (Tabel 5). Korelasi antar tinggi sterik dengan tinggi SLA pada kelompok 2 lebih besar daripada korelasi antar kedua parameter tersebut pada kelompok pertama. Dalam kelompok 2 ini juga ditemukan adanya korelasi yang cukup signifikan antara tinggi sterik muka laut dan massa lautan yang merupakan variabel bebas dalam persamaan tinggi muka laut total. Namun signifikansi korelasi antar dua variabel bebas dalam kelompok ini lebih besar daripada signifikansi dalam kelompok 1. Hal ini disebabkan oleh panjang deret waktu yang lebih pendek dibanding deret waktu dalam kelompok 1.

Dalam kelompok 2 ini juga ditemukan adanya korelasi yang cukup signifikan antara tinggi sterik muka laut dan massa lautan yang merupakan variabel bebas dalam persamaan tinggi muka laut total. Adanya korelasi yang cukup besar antara dua variabel bebas dalam kelompok ini menyebabkan ambiguitas dalam penentuan kontribusi efek sterik dan eustatik pada perubahan tinggi muka laut.

Secara visual sebagaimana tampak dalam Gambar 6, efek sterik memberikan kontribusi yang lebih signifikan daripada efek eustatik, yang ditunjukkan dengan kemiripan bentuk plot deret waktu SLA dan tinggi sterik. Namun secara kuantitatif, efek eustatik lah yang memiliki korelasi yang lebih signifikan. Hal ini dapat direduksi jika jumlah pengamatan deret waktu lebih besar (rentang waktu pengamatannya lebih panjang).

Tabel 4. Matriks koefisien korelasi antar parameter pada kelompok 2

	SLA dari Altimetri	Tinggi sterik dari Argo	EWT dari GRACE
SLA dari Altimetri	1	0.200557778	0.389158537
Tinggi sterik dari Argo	0.200557778	1	0.179785691
EWT dari GRACE	0.389158537	0.179785691	1

Tabel 5. Matriks p untuk kelompok 2

	SLA dari Altimetri	Tinggi sterik dari Argo	EWT dari GRACE
SLA dari Altimetri	1	0.220870074	0.014340777
Tinggi sterik dari Argo	0.220870074	1	0.273435385
EWT dari GRACE	0.014340777	0.273435385	1

5. Kesimpulan

Perubahan muka laut total di wilayah Samudera Pasifik bagian barat pada periode 1992 hingga 2012 berdasarkan data satelit altimetri Topex/Poseidon, Jason 1 dan Jason 2 berkisar antara -0,758 hingga 12,936 mm/tahun, dengan nilai rerata adalah $6,982 \pm 3,493$ mm/tahun. Perubahan muka laut total ini diwakili oleh perubahan SLA yang merupakan tinggi permukaan laut di atas permukaan geofisik, yang dalam penelitian ini adalah *global mean sea level surface* DTU 10.

Perubahan tinggi muka laut sterik berdasarkan data pelampung Argo pada periode 2000-2013 berkisar antara -24 hingga 48 mm/tahun dengan nilai rerata $14,352 \pm 13,002$ mm/tahun. Tinggi muka laut sterik ini diperoleh dengan menggunakan algoritma TEOS-10 (*Thermodynamic Equation of Seawater-2010*). Tekanan acuan yang digunakan untuk menentukan tinggi sterik dalam penelitian ini adalah 0 desibar dan 900 desibar. Secara teoritis, tekanan acuan yang sebaiknya digunakan adalah 2000 desibar, yaitu tekanan di mana suhu dan salinitas air laut tidak mengalami perubahan yang signifikan. Tekanan 900 dBar dipilih karena ketersediaan data dengan tekanan lebih besar dari 900 dBar sangat terbatas.

Perubahan tinggi muka laut eustatik yang diwakili oleh perubahan Equivalent Water Thickness (EWT) di area penelitian dari data GRACE berkisar antara -0,58 hingga -0,22 mm/tahun. Nilai rerata perubahan tinggi muka laut akibat efek eustatik adalah $-0,4026 \pm 0,1072$ mm/tahun. Nilai-nilai ini mengindikasikan terjadinya penurunan EWT yang cukup signifikan dalam 4 tahun terakhir (2009-2013). Namun fenomena ini bertentangan dengan

fakta penelitian di mana perubahan EWT menunjukkan korelasi dengan perubahan SLA yang lebih besar daripada korelasi tinggi sterik.

Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa korelasi antara EWT dan nilai SLA lebih signifikan dibanding korelasi antara tinggi sterik muka laut dan SLA. Namun diperlukan penyelidikan lebih lanjut untuk menentukan faktor mana yang lebih berkontribusi terhadap perubahan muka laut di area penelitian ini. Hal ini terjadi akibat masih terdapatnya korelasi yang cukup besar antara tinggi sterik muka laut dan massa lautan yang merupakan variabel bebas dalam persamaan tinggi muka laut total. Untuk memperkecil korelasi tersebut, diperlukan pengamatan tinggi sterik dan massa lautan dengan rentang waktu yang lebih panjang.

6. Saran

Berikut ini beberapa saran terhadap penelitian lanjutan mengenai perubahan muka laut di wilayah Samudera Pasifik bagian barat:

1. Untuk memperoleh hasil perubahan muka laut total yang lebih teliti, diperlukan data dari satelit altimetri lain seperti Envisat dan ERS. Dengan adanya data dari satelit altimetri selain Topex/Jason maka dapat diperoleh perubahan muka laut total dengan resolusi spasial yang lebih baik, karena lintasan yang berbeda dari satelit-satelit tersebut.
2. Untuk memperoleh solusi geoid yang lebih teliti, dapat dikombinasikan data gravimetri hasil pengolahan dari beberapa institusi lain. Selain itu dapat pula digunakan satelit gravimetri lain seperti GOCE dan CHAMP untuk mendapatkan gambaran yang lebih akurat terhadap perubahan massa lautan.
3. Dalam penentuan tinggi sterik muka laut, perlu digunakan tekanan acuan yang berbeda. Sebagaimana dipaparkan dalam bagian sebelumnya, tekanan 900 dBar dipilih sebagai acuan. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dipilih tekanan acuan yang beragam, yakni 500 dBar, 1000 dBar, 1500 dBar dan 2000 dBar. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai pembandingan tinggi muka laut sterik sehingga dapat dilakukan analisis yang lebih baik.
4. Tiap-tiap jenis data (altimetri, Argo, dan GRACE) perlu diberikan koreksi yang lebih lanjut (*advance*). Koreksi-koreksi tersebut misalnya adalah GIA (*Glacial Isostatic Adjustment*) dan indeks ENSO (*El-Nino Southern Oscillation*) untuk hasil perubahan muka laut total dari data altimetri.
5. Perlu dilakukan analisis spektral terhadap deret waktu dari setiap jenis data. Hal ini untuk menghilangkan *noise*, dan mempermudah peneliti untuk mengekstraksi spektrum yang diinginkan.
6. Untuk mendapatkan perubahan tinggi sterik yang lebih teliti dan terpercaya, data Argo dapat dikombinasikan dengan data CTD (Conductivity-Temperature-Depth), XBT (Expendable Bathythermograph) maupun data satelit radiometer.
7. Panjang pengamatan untuk tiap-tiap jenis data sebaiknya cukup besar, untuk memperkecil korelasi antar dua variabel bebas yang dapat mempengaruhi penarikan kesimpulan tentang kontribusi tiap efek.

7. Daftar Pustaka

- Ablain, M., Cazenave, A., Valladeau, G., & Guinehut, S. (2009). A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 2003-2008. *Ocean Sciences*, 193-201.
- Bindoff, N., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Unnikrishnan, A. (2007). Observations: oceanic climate and sea level. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cazenave, A., & Llovel, W. (2010). Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science*, 145-173.
- Cazenave, A., & Nerem, R. (2004). Present-day sea level change: Observations and causes. *Review Geophysics*.
- Church, J., Gregory, J., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M., Woodworth, P. (2001). Changes in sea level, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Han, D., & Wahr, J. (1994). The Viscoelastic Relaxation of a Realistically Stratified Earth, and a Further Analysis of Postglacial Rebound. *Geophysic Journal International*, 287-311.
- Hartanto, P. (2012). Identifikasi Dan Analisis Karakteristik Fisis Waveform Satelit Altimetri Di Indonesia (Studi Kasus: Beberapa Wilayah Pesisir Pulau Sulawesi). Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Llovel, W., Guinehut, S., & Cazenave, A. (2010). Regional and interannual variability in sea level over 2002-2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass. *Ocean Dynamics*, 1193-1204.
- Leuliette, E., & Miller, L. (2009). Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE. *Geophysical Research Lett.*
- Rohman, A. (2010). Trend Linier Perubahan Kedudukan Muka Laut Berdasarkan Data Satelit Altimetri ERS-2 (1995-2003) dan Envisat (2003-2009)(Studi kasus: perairan Indonesia). Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sutton, P., & Roemmich, D. (2012). The Relationships Between Argo Steric Height and AVISO Sea Surface Height. *Ocean Surface Topography Science Team: 4th Argo Science Workshop*.
- Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE.

Willis , J. K., Chambers, D. P., & Nerem, R. S. (2008). Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales. *Journal of Geophysical Research*, 113(C06015). doi:10.1029/2007JC004517

Wunsch, C., Ponte, R., & Heimbach, P. (2007). Decadal trends in sea level patterns: 1993–2004. *Journal of Climate Change*, 5889-5911.

<http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection>

<http://rads.tudelft.nl/rads/data/radsdata1.cgi>

<http://grace.jpl.nasa.gov>