

ANALISIS SEA LEVEL RISE DAN KOMPONEN PASANG SURUT DENGAN MENGGUNAKAN DATA SATELIT ALTIMETRI JASON-2

Yosevel Lyhardo Sidabutar, Bandi Sasmito, Fauzi Janu Amarrohman *)

Program Studi Teknik Geodesi Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang Semarang Telp. (024) 76480785, 76480788
email : geodesi@undip.ac.id

ABSTRAK

Kenaikan permukaan laut merupakan sebuah fenomena yang terjadi akibat adanya perubahan iklim. Kenaikan permukaan laut dapat menyebabkan tenggelamnya wilayah pesisir dan pulau-pulau, erosi pantai, dan kerusakan ekosistem penting seperti lahan basah dan hutan bakau. Kenaikan permukaan laut memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera yang memiliki ratusan pulau-pulau kecil dan terletak pada pertemuan Samudera Hindia dan Laut Andaman.

Penelitian ini menggunakan data pengamatan permukaan laut dengan menggunakan satelit altimetri Jason-2 pada periode 2011-2014 sebagai data primer. Interpolasi data satelit altimetri dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak matlab dengan menggunakan metode pembobotan invers jarak. Penelitian ini menggunakan analisis trend linear dan analisis harmonik untuk mengetahui kecepatan kenaikan permukaan laut dan nilai komponen pasang surut laut pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera.

Pengamatan permukaan laut dengan menggunakan data Satelit Altimetri Jason-2 pada periode 2011-2014 menunjukkan adanya fenomena kenaikan permukaan laut pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan rata-rata nilai kenaikan sebesar +14,88 mm/tahun. Nilai *trend linier* kenaikan permukaan laut rata-rata tertinggi terdapat pada Perairan Mentawai dengan nilai *trend linier* sebesar +22,64 mm/tahun dan *trend linier* kenaikan permukaan laut rata-rata terendah terdapat pada Perairan Bengkulu dengan nilai *trend linier* sebesar +10,12 mm/tahun. Komponen pasang surut pada daerah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan pengamatan Satelit Altimetri Jason-2 selama tahun 2011-2014 menghasilkan nilai rata-rata amplitudo M2 sebesar 0,134 m, nilai rata-rata amplitudo S2 sebesar 0,058 m, nilai rata-rata amplitudo K2 sebesar 0,021 m, nilai rata-rata amplitudo N2 sebesar 0,032 m, nilai rata-rata amplitudo K1 sebesar 0,048 m, nilai rata-rata amplitudo O1 sebesar 0,031 m, nilai rata-rata amplitudo P1 sebesar 0,025 m, dan nilai rata-rata elevasi HHWL sebesar 0,70759 m, nilai rata-rata elevasi MHWL sebesar 0,50083 m, nilai rata-rata elevasi MSL sebesar 0,06967 m, nilai rata-rata elevasi MLWL sebesar -0,36148 m, nilai rata-rata elevasi CDL sebesar -0,47500 m, nilai rata-rata elevasi LLWL sebesar -0,56825 m.

Kata Kunci : kenaikan muka laut, laut, pasang surut laut, permukaan laut, satelit altimetri.

ABSTRACT

Sea level rise is a phenomenon that occurs due to climate change. Sea level rise cause the sinking of coastal areas and islands, coastal erosion, and damage to important ecosystems such as wetlands and mangroves. Sea level rise has a big impact on the western part of Sumatera Island ocean that has hundreds of small islands and located at the confluence of the Indian Ocean and the Andaman Sea.

This research used sea surface observational data using the altimetry satellite Jason-2 in the period 2011-2014 as the primary data. Altimetry satellite data interpolation calculated by inverse distance weighting method using matlab software. This research used linear trend analysis and harmonic analysis to determine the speed of sea level rise and the ocean tides component value in western part of Sumatra Island ocean.

Sea surface observations using Jason-2 altimetry satellites data in the 2011-2014 period showed the phenomenon of sea level rise on the western part of Sumatera Island ocean with the average increase value by +14.88 mm / year. The highest average value of the linear trend found in Mentawai ocean with the average value of the linear trend by +22.64 mm / year and the lowest average value of the linear trend found in Bengkulu Ocean with the average value of the linear trend by +10.12 mm / year. The ocean tide components on the western part of Sumatra Island ocean with altimetry satellites Jason-2 observations during 2011-2014 resulted in an average amplitude value M2 amounted to 0.134 cm, the average amplitude value S2 at 0.058 cm, the average amplitude value of K2 at 0,021 cm, the average value of the amplitude of N2 at 0,032 cm, the average amplitude value K1 at 0,048 cm, the average amplitude value O1 at 0,031 cm, the average amplitude value P1 at 0.025 cm and the average HHWL elevation value at 0,70759 m, the average MHWL elevation value at 0,50083 m, the average MSL elevation value at 0,06967 m, the average MLWL elevation value at -0,36148 m, the average CDL elevation value at -0,47500 m, the average LLWL elevation value at -0,56825 m.

Keywords : sea level rise, ocean tides, sea surface, altimetry satellite.

*) Penulis, Penanggungjawab

I. Pendahuluan

I.1. Latar Belakang

Salah satu dampak yang paling signifikan dari perubahan iklim adalah kenaikan permukaan laut yang dapat menyebabkan tenggelamnya wilayah pesisir dan pulau-pulau, erosi pantai, dan kerusakan ekosistem penting seperti lahan basah dan hutan bakau. Peningkatan suhu global mengakibatkan terjadinya kenaikan permukaan laut yang disebabkan oleh ekspansi termal dari lapisan atas laut, dan mencairnya gletser serta lapisan es di kutub. Secara umum, kenaikan muka air laut merupakan dampak dari pemanasan global (*global warming*) yang melanda seluruh belahan bumi. Hal tersebut tentunya sangat berpengaruh pada wilayah Indonesia yang mana sekitar 77% dari keseluruhan luas wilayahnya adalah perairan (Wuriatmo, 2012)

Fenomena kenaikan permukaan laut direpresentasikan dengan MSL (*mean sea level*) yang dipengaruhi secara dominan oleh ekspansi termal dan mencairnya es di kutub (Bindoff, 2007). Fenomena tersebut mengakibatkan peningkatan volume air laut secara terus-menerus. Satelit Altimetri dapat melakukan pengukuran perubahan kedudukan permukaan air laut dalam jangka panjang yang dapat memberikan pembuktian prediksi model-model iklim pemanasan global.

Lokasi penelitian pada tugas akhir ini adalah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera. Ditinjau dari letak perairannya, Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera terletak di pertemuan beberapa perairan, seperti Samudera Hindia dari sebelah Barat dan Laut Andaman dari sebelah Utara. Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera memiliki kondisi tektonik aktif, karena merupakan bagian dari pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia yang dicirikan oleh kegempaan aktif. Gempa-gempa besar yang berpusat di dasar laut sering terjadi di wilayah ini dengan kedalaman relatif dangkal yang mempengaruhi kenaikan permukaan laut dan gelombang laut.

I.2. Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Apakah fenomena *sea level rise* terjadi di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera pada periode 2011-2014? apabila terjadi berapa kecepatan kenaikan tersebut?
2. Bagaimanakah hasil *trend linear* perubahan kenaikan muka laut pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2* pada periode 2011-2014?
3. Bagaimanakah hasil nilai komponen pasang surut pada daerah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2* pada periode 2011-2014?

I.3. Batasan Masalah

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari satelit altimetri *Jason-2* tahun 2011-2014.
2. Studi kasus dalam penelitian ini adalah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera yang terdiri dari Perairan Aceh, Perairan Mentawai dan Perairan Bengkulu.
3. Interpolasi yang digunakan dalam pengolahan data *sea level anomaly* adalah interpolasi *Inverse Distance Weighted (IDW)*.
4. Metode analisis harmonik yang digunakan untuk menentukan nilai komponen pasang surut adalah metode *least square*.

I.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui besar kenaikan muka laut di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera pada periode 2011-2014.
2. Untuk mengetahui nilai *trend linear* kenaikan muka laut di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2*
3. Untuk mengetahui nilai-nilai komponen pasang surut pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2*.

II. Tinjauan Pustaka

II.1. Sea Level Rise

Sea level rise adalah fenomena naiknya permukaan laut yang umumnya selalu dikaitkan dengan pemanasan global. Permukaan laut telah mengalami kenaikan setinggi 120 meter sejak puncak zaman es 18.000 tahun yang lalu. Kenaikan tertinggi muka air laut terjadi sebelum 6.000 tahun yang lalu. Sejak 3.000 tahun yang lalu hingga awal abad ke-19, muka air laut hampir tetap hanya bertambah 0,1 hingga 0,2 mm/tahun; sejak tahun 1900, permukaan laut naik 1 hingga 3 mm/tahun; sejak tahun 1992 Satelit Altimetri TOPEX/Poseidon mengindikasikan laju kenaikan muka laut sebesar 3 mm/tahun. Perubahan ini bisa jadi merupakan pertanda awal dari efek pemanasan global terhadap kenaikan muka air laut (Watson, 2015).

Pemanasan global merupakan efek akibat bertambahnya gas-gas rumah kaca seperti CO₂. Pemanasan pada awalnya menyebabkan lebih banyaknya air yang menguap ke atmosfer. Karena uap air sendiri merupakan gas rumah kaca, pemanasan terus berlanjut dan menambah jumlah uap air di udara sampai tercapainya suatu kesetimbangan konsentrasi uap air. Efek rumah kaca yang dihasilkannya lebih besar bila dibandingkan oleh akibat gas CO₂ sendiri. Walaupun hal tersebut

meningkatkan kandungan air absolut di udara, kelembaban relatif udara hampir konstan atau bahkan agak menurun karena udara menjadi menghangat. Ketika suhu global meningkat, es yang berada di dekat kutub mencair dengan kecepatan yang terus meningkat. Bersamaan dengan melelehnya es tersebut, daratan atau air di bawahnya terbuka. Baik daratan maupun air memiliki kemampuan memantulkan cahaya lebih sedikit bila dibandingkan dengan es, dan akibatnya menyerap lebih banyak radiasi matahari. Hal tersebut menambah pemanasan suhu global dan menimbulkan lebih banyak lagi es yang mencair, kemudian menjadi suatu siklus berkelanjutan yang menyebabkan terjadinya fenomena *sea level rise*.

II.2. Konstanta Harmonik Pasang Surut

Pada umumnya digunakan 9 komponen utama konstanta harmonik pasang surut untuk keperluan rekayasa, yaitu: $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, O_1, P_1, M_4$ dan MS_4 . Konstanta harmonik pasang surut adalah konstanta-konstanta yang dapat menyebabkan terjadinya pasang surut. Konstanta-konstanta pasang surut tersebut memiliki sifat yang harmonik terhadap waktu, sehingga dinamakan konstanta harmonik pasang surut. Secara garis besar konstanta harmonik pasang surut dapat dibagi menjadi tiga kelompok seperti di bawah ini (Rawi, 1999):

1. Konstanta harmonik pasang surut periode harian (*diurnal period tide*)
2. Konstanta harmonik pasang surut periode harian ganda (*semidiurnal period tide*)
3. Konstanta harmonik pasang surut periode panjang (*long period tide*)

II.3. Satelit Altimetri

Satelit Altimetri merupakan teknik pengamatan muka air laut secara ekstraterestrial. Satelit Altimetri dilengkapi dengan pemancar pulsa radar, penerima pulsa radar yang sensitif, serta jam berakurasi tinggi. Pada prinsipnya Satelit Altimetri diciptakan untuk mengetahui sistem iklim global yang kemudian dijabarkan sebagai berikut (RADS):

1. Mengamati sirkulasi lautan secara global
2. Memantau volume dari lempengan es kutub
3. Mengamati perubahan muka laut rata-rata secara global

Dengan kemampuannya untuk mengamati topografi dan dinamika dari permukaan laut secara berkelanjutan, maka Satelit Altimetri tidak hanya bermanfaat untuk pemantauan perubahan muka laut rata-rata secara global, tetapi juga bermanfaat untuk beberapa aplikasi geodetik dan oseanografi lainnya (SRSRA, 2001 dan Seeber, 1993), seperti :

1. Penentuan topografi permukaan laut (*Sea Surface Topographic*)
2. Penentuan topografi permukaan es
3. Penentuan geoid di wilayah lautan
4. Penentuan karakteristik arus

5. Penentuan tinggi dan panjang gelombang
6. Studi pasang surut di lepas pantai
7. Penentuan kecepatan angin di atas permukaan laut
8. Penentuan batas wilayah laut dan es
9. Studi fenomena *El nino*
10. Unifikasi datum tinggi antar pulau

II.3.1. Satelit Altimetri Jason-2

Satelit *Jason-2* dibangun oleh *Thales Alenia Space* menggunakan *platform Proteus*, di bawah kontrak dari CNES Perancis, NOAA Amerika Serikat, NASA Amerika Serikat, dan EUMETSAT Eropa. Seperti namanya, satelit *Jason-2* merupakan kelanjutan dari satelit *Jason-1*. Satelit *Jason-2* diluncurkan pada tanggal 20 Juni 2008, dari Space Launch Complex 2W di Vandenberg Air Force Base di California, Amerika Serikat. Satelit ini dapat memantau 95 persen dari lautan bebas es bumi setiap 10 hari dengan ketelitian hingga 4 cm. Satelit *Jason-2* memiliki orbit yang sama dengan *Jason-1* dengan 254 *pass* dan 10 hari siklus berulang. Satelit *Jason-2* ditempatkan 1 menit terpisah dari *Jason-1* untuk memungkinkan antar kalibrasi dari semua sistem.

Orbit Satelit *Jason-2* memiliki pertahanan yang baik terhadap gaya gravitasi bumi yang bervariasi, tekanan radiasi matahari, dan gaya lainnya. Orbit satelit *Jason-2* diverifikasi pada dua tempat yaitu pada CNES yang berlokasi di Cape Senetosa, Pulau Corsica dengan posisi 8°48' T dan 41°34' U (*pass* naik 085) dan stasiun NASA yang berlokasi di Harvest oil platform dekat Pt. Conception, California dengan posisi 239°19' T dan 34°28' U (*pass* naik 043).

Resolusi temporal satelit *Jason-2* adalah 10 hari, tepatnya 9,9156 hari dengan jarak antar lintasan satelit terpisah sejauh 315 km di ekuator (AVISO and PODAAC, 2008). Sepanjang jalur pengukuran data diambil tiap detik dengan jarak antar titik pengukuran sejauh 5 km. Dalam satu periode pengukuran (*cycle*) terdapat 127 lintasan dengan waktu tempuh 112 menit untuk satu lintasan. Tiap lintasan terdiri dari dua fase, yaitu fase naik (*ascending*) dari 66,15° LS sampai 66,15° LU dan fase turun (*descending*) dari 66,15° LU sampai 66,15° LS (OSTM/*Jason-2 Products User Handbook*, 2009).



Gambar 1. Satelit Altimetri *Jason-2* (CNES, 2015)

II.4. Trend Linier

Analisis *trend* merupakan suatu metode analisis yang ditujukan untuk melakukan suatu estimasi atau peramalan. Analisis *trend linier* membutuhkan berbagai macam informasi (data) yang cukup banyak dan diamati dalam periode waktu yang cukup panjang, sehingga dari hasil analisis tersebut dapat diketahui sampai berapa besar fluktuasi yang terjadi dan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi terhadap perubahan tersebut.

Analisis deret waktu (*time series*) merupakan analisis terhadap perubahan variabel pada selang waktu tertentu dari waktu ke waktu. Nilai kecepatan kenaikan permukaan laut dapat ditentukan dengan menggunakan data *sea level anomaly* (SLA) yang merupakan data dengan deret waktu (*time series*). Pada penelitian ini analisis *trend* yang digunakan adalah analisis *trend linier* dengan menggunakan persamaan (II-29) berikut (Bianchi, 1999).

$$y = mx + c \dots\dots\dots (II-1)$$

Keterangan :

- y = jarak vertikal
- x = jarak horizontal
- m = kemiringan garis
- c = perpotongan pada garis y

Analisis *trend linier* dilakukan untuk melakukan estimasi kecepatan *sea level rise* dengan cara menghitung gradien dari grafik *sea level anomaly*. Grafik *sea level anomaly* memiliki komponen y yang merupakan data *sea level anomaly* (meter), dan komponen x yang merupakan data satuan waktu (*cycle*). Gradien (m) merupakan kemiringan garis yang mewakili kecepatan *sea level rise*. Kecepatan *sea level rise* yang dihasilkan memiliki satuan *meter/cycle* (1 cycle = 9,9156 hari).

II.5. Analisis Harmonik

Sifat dan karakteristik pasang surut di suatu tempat dari hasil pengamatan pasang surut dalam kurun waktu tertentu dapat diketahui dengan melakukan analisis harmonik pasang surut laut (Soeprapto, 1999). Tujuan dari analisis harmonik pasang surut adalah untuk menghitung amplitudo dan keterlambatan fase. Amplitudo yang dihitung merupakan hasil respons dari kondisi laut setempat terhadap pasang surut setimbang sedangkan keterlambatan fase yang dihitung merupakan keterlambatan fase dari gelombang tiap komponen terhadap pasang surut setimbang. Selanjutnya nilai perubahan amplitudo dan keterlambatan fase tersebut dinyatakan dalam konstanta harmonik.

Pada umumnya digunakan 9 komponen utama konstanta harmonik pasang surut untuk keperluan rekayasa, yaitu: M₂, S₂, K₂, N₂, K₁, O₁, P₁, M₄ dan MS₄. Penjelasan mengenai komponen harmonik pasang surut tersebut dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen harmonik utama pasang surut (Rawi, 1999)

Typa Pasang surut	Keterangan	Simbol	Kec. Sudut (°/jam)
Ganda	Dipengaruhi oleh Bulan Utama	M ₂	28,9841
	Dipengaruhi oleh Matahari Utama	S ₂	30
	Dipengaruhi oleh akibat lintasan bulan berbentuk ellips	N ₂	28,4397
	Dipengaruhi oleh lintasan matahari berbentuk ellips	K ₂	30,0821
Tunggal	Dipengaruhi oleh deklinasi Bulan dan deklinasi matahari	K ₁	15,0411
	Dipengaruhi oleh deklinasi Bulan Utama	O ₁	13,943
	Dipengaruhi oleh deklinasi Matahari Utama	P ₁	14,9589
Perairan Dangkal	Kecepatan sudut dua kali kecepatan sudut M ₂	M ₄	59,97
	Merupakan modulasi dari M ₂ dan S ₂ dengan kecepatan sudut jumlah kecepatan sudut M ₂ dan S ₂	MS ₄	59,98

III. Pelaksanaan Penelitian

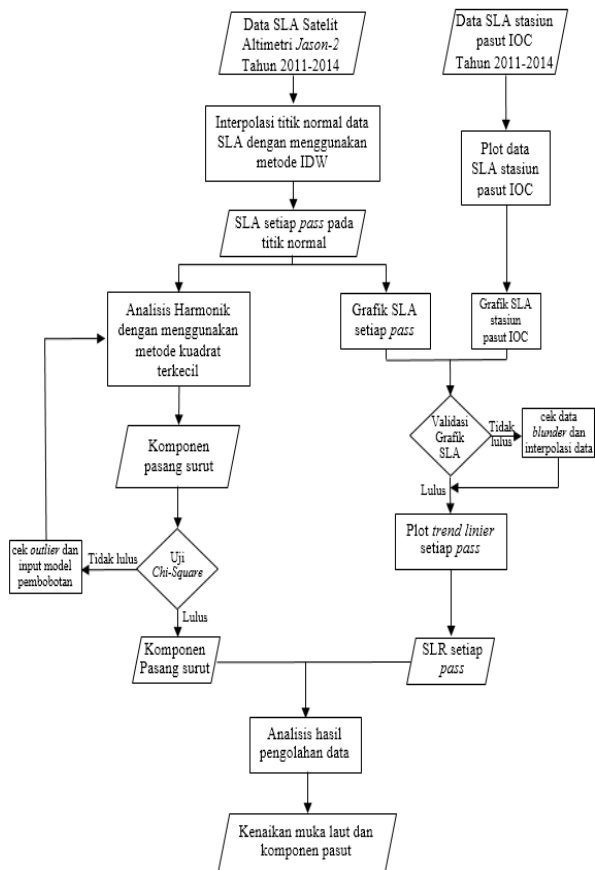
III.1. Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan dan data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah :

1. Alat Penelitian
 - a. *Hardware*
Laptop HP Pavilion V042TX Intel Core i5-4210U 2,40 GHz, OS Windows 7 Ultimate 64-bit, 4GB RAM, Hard Disk Drive 750 GB
 - b. *Software*
Matlab 2008, Microsoft Office Excell 2013, Microsoft Office Word 2013
2. Data Penelitian
 - a. Data *sea level anomaly* hasil pengamatan Satelit Altimetri Jason-2 pada daerah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan titik pengamatan Perairan Aceh, Perairan Mentawai, dan Perairan Bengkulu pada periode 2011-2014 yang diperoleh dari website RADS.
 - b. Data stasiun pasang surut pada setiap daerah pesisir titik pengamatan yang diperoleh melalui website IOC-sealevelmonitoring.

III.2. Metodologi Penelitian

Analisis *sea level rise* dan komponen pasang surut dengan menggunakan data Satelit Altimetri Jason-2 dijabarkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir analisis sea level rise dan komponen pasang surut

III.3. Interpolasi Titik Normal

Jarak titik pengamatan (*footprint*) Satelit Altimetri memiliki jarak sekitar 7 km atau sekitar $0,06288^\circ$ pada orbit satelit dan mengalami inkonsistensi *track* sebesar ± 1 km. Dalam penelitian ini, nilai SLA pada titik normal didapatkan dengan menggunakan interpolasi *inverse distance weighted* (IDW) dengan pengambilan titik sampel metode *nearest neighbour* yang dijalankan dengan *software Matlab 2008*. Titik normal yang digunakan merupakan titik *cross over*, yaitu titik perpotongan antara *ascending pass* dan *descending pass* dari *groundtrack* Satelit Altimetri.

III.4. Analisis Harmonik

Analisis harmonik pasang surut bertujuan untuk menghitung amplitudo dan beda fasa dari gelombang tiap komponen. Pada penelitian ini metode analisis harmonik yang digunakan adalah metode kuadrat terkecil (*least square*) yang diolah dengan menggunakan *software microsoft excel 2013*.

Penghitungan analisis harmonik pada setiap titik dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama dilakukan analisis harmonik dengan menggunakan komponen pasang surut laut yang ada sesuai dengan tahapan-tahapan perhitungan analisis harmonik. Tahap kedua melakukan perhitungan analisis

harmonik dengan menggunakan metode pembobotan. Hasil dari analisis harmonik berupa amplitudo komponen pasang surut laut dan fase gelombang komponen pasang surut utama pada setiap *pass*.

III.5. Uji Chi-square

Uji *chi-square* dilakukan untuk mengetahui apakah perataan analisis harmonik yang telah dilakukan benar secara statistik. Uji statistik dapat digunakan untuk mendeteksi adanya blunder pada data pengamatan yang dihasilkan. Uji *chi-square* dilakukan dengan cara menghitung batas atas, batas bawah dan nilai hasil uji statistik *chi-square* pada setiap *pass*. Pengujian *chi-square* dilakukan dengan menggunakan rumus uji *chi-square* yang diaplikasikan pada *software Microsoft Excel 2013*.

Dalam pengolahannya, apabila hasil pengujian *chi-square* terletak di bawah nilai kritis bawah dari wilayah penerimaan hasil uji variansi, maka kesalahan yang mungkin terjadi pada proses perataannya (Unimelb, 2015) adalah :

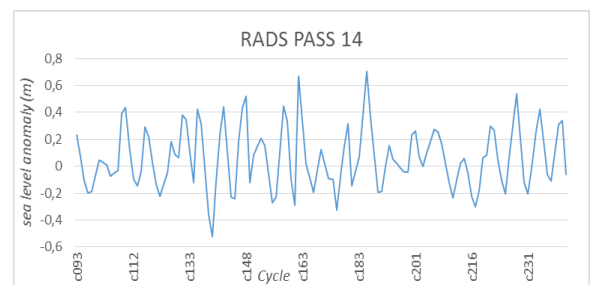
- Terlalu banyak komponen pasang surut yang dilibatkan dalam hitung perataan.
- Matriks bobot yang diberikan terhadap data lebih kecil dari pada bobot yang seharusnya (*under-estimate*).

Apabila hasil pengujian *chi-square* terletak di atas nilai kritis atas dari wilayah penerimaan hasil uji variansi, maka kesalahan yang mungkin terjadi pada proses perataannya adalah:

- Komponen pasang surut yang dilibatkan dalam hitung perataan terlalu sedikit.
- Matriks bobot yang diberikan terhadap data terlalu besar dari pada bobot yang seharusnya (*over-estimate*).
- Terdapat *blunder* di dalam data.

III.6. Plotting Data SLA

Plotting SLA bertujuan untuk mendapatkan hasil *trend linier* melalui grafik SLA yang sudah diinterpolasi. Dalam penelitian ini, *plotting* dilakukan dengan menggunakan *Ms.Excell* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

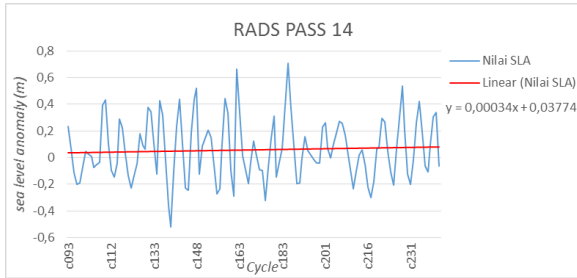


Gambar 3. Contoh Plotting SLA

III.7. Perhitungan Trend Linier

Analisis *trend linier* data dilakukan untuk menghitung laju *sea level rise* yang terjadi pada

setiap pass. Analisis *trend linier* dilakukan dengan menggunakan *software Microsoft Excel 2013*. Hasil perhitungan *trend linear* dapat ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Contoh *Plotting trend linier*

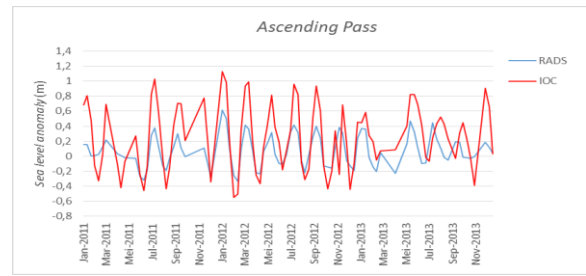
Nilai kemiringan garis (*m*) yang dihasilkan oleh *pass 14* pada Gambar 4 adalah sebesar 0,00034. Dengan demikian dapat diartikan bahwa kecepatan *sea level rise* yang terjadi pada *Pass 14* adalah 0,00034 *meter/cycle* atau dapat diubah menjadi 13,25185 mm/tahun.

Kecenderungan data (*m*) dapat bernilai positif (naik) atau negatif (turun) sesuai dengan hasil pengolahan data yang dilakukan. Pada kondisi yang sebenarnya permukaan laut selalu mengalami kenaikan, tetapi *trend linier* dapat menghasilkan nilai negatif (turun) yang terjadi akibat fenomena-fenomena alam yang terjadi di lautan atau karena *error* yang terdapat pada hasil data pengamatan satelit.

III.8. Validasi Data SLA dengan Data Stasiun Pasut IOC

Data SLA Satelit Altimetri dan pasang surut pantai memiliki beberapa perbedaan dan salah satunya yang paling mendasar adalah pada lokasi pengamatan. Satelit Altimetri mengamati perubahan kedudukan permukaan laut pada lautan lepas, sedangkan stasiun pasang surut mengamati perubahan kedudukan permukaan laut pada pesisir pantai. Perbedaan lokasi pengamatan mengakibatkan adanya perbedaan pada nilai SLA yang dihasilkan oleh pengamatan Satelit Altimetri dan stasiun pasang surut.

Validasi dilakukan dengan cara mengamati grafik SLA hasil pengamatan Satelit Altimetri dengan grafik perubahan permukaan laut hasil pengamatan stasiun pasang surut IOC. Persamaan pada bentuk grafik saat mengalami kenaikan dan penurunan dapat menunjukkan adanya keterkaitan antara pengamatan Satelit Altimetri dan pengamatan pasang surut pantai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

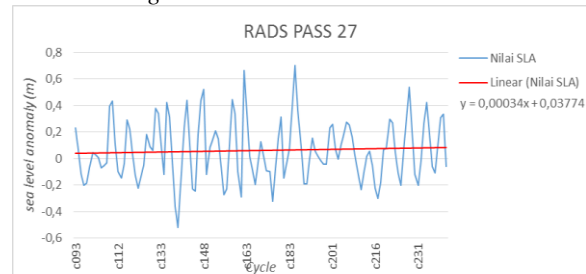


Gambar 5. Perbandingan Grafik SLA Satelit Altimetri dan Stasiun Pasut

IV. Hasil dan Analisis
IV.1 Hasil Pengamatan Sea Level Rise

Pengamatan laju *sea level rise* dilakukan dengan cara mencari nilai *trend linier* pada data *sea level anomaly*. Hasil pengamatan *sea level rise* Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera adalah sebagai berikut.

1. Perairan Aceh
a. *Ascending Pass*



Gambar 6 Grafik *sea level rise* Perairan Sabang *ascending pass 27*

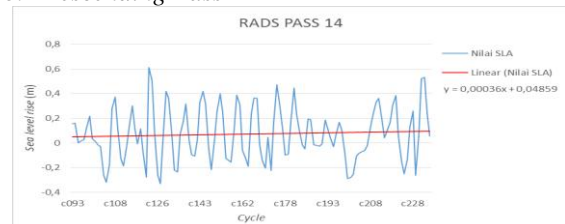
Dari Gambar 6 diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *ascending pass 27* sebagai berikut :

$$(trend\ linear)\ y = +0,00034x + 0,03774.....(IV-1)$$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Laju SLR} &= +0,00034 \times (1000/(9,9156/365)) \\ &= +12,52 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

b. *Descending Pass*



Gambar 7 Grafik *sea level rise* Perairan Sabang *descending pass 14*

Dari Gambar 7 dapat diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *ascending pass 001* sebagai berikut :

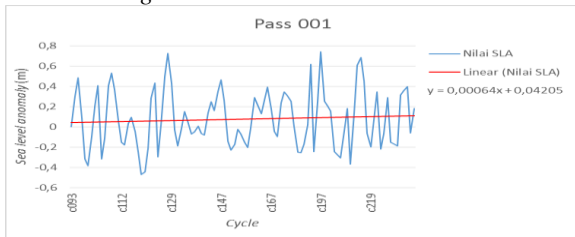
(trend linear) $y = +0,00036x + 0,04859.....(IV-2)$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

Laju SLR = $+0,00036 \times (1000/(9,9156/365))$
 = +13,25 mm/tahun

2. Perairan Mentawai

a. Ascending Pass



Gambar 8 Grafik sea level rise Perairan Mentawai ascending pass 001

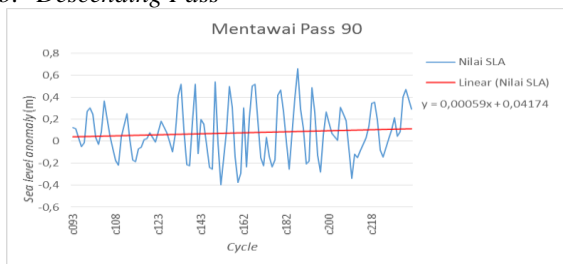
Dari Gambar 8 dapat diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *ascending pass 001* sebagai berikut :

(trend linear) $y = +0,00064x + 0,04205.....(IV-3)$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

Laju SLR = $+0,00064 \times (1000/(9,9156/365))$
 = +23,56 mm/tahun

b. Descending Pass



Gambar 9 Grafik sea level rise Perairan Mentawai descending pass 90

Dari Gambar 9 dapat diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *descending pass 90* sebagai berikut :

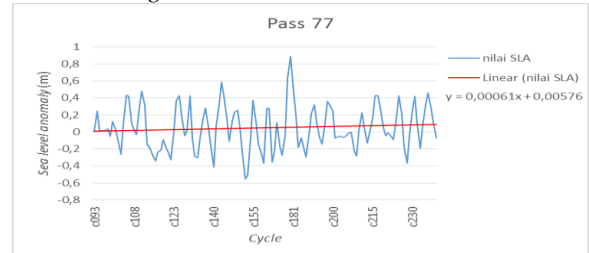
(trend linear) $y = +0,00059x + 0,04174.....(IV-4)$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

Laju SLR = $+0,00059 \times (1000/(9,9156/365))$
 = +21,72 mm/tahun

3. Perairan Bengkulu

a. Ascending Pass



Gambar 10 Grafik sea level rise Perairan Bengkulu ascending pass 77

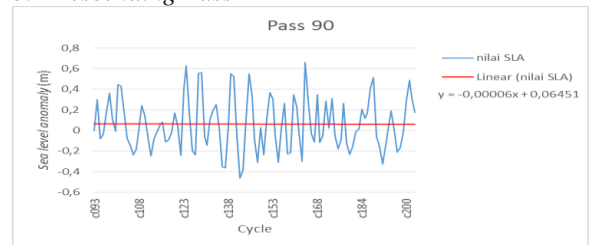
Dari Gambar 10 dapat diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *ascending pass 77* sebagai berikut :

(trend linear) $y = +0,00061x + 0,00576.....(IV-5)$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

Nilai SLR = $+0,00061 \times (1000/(9,9156/365))$
 = +22,45 mm/tahun

b. Descending Pass



Gambar 11 Grafik sea level rise Perairan Bengkulu descending pass 90

Dari Gambar 11 dapat diketahui nilai kenaikan permukaan laut pada *descending pass 90* sebagai berikut :

(trend linear) $y = -0,00006x + 0,06451.....(IV-6)$

Nilai *trend linear* yang telah dihitung tersebut memiliki satuan *m/cycle*. Nilai *sea level rise* dapat dihitung dengan cara merubah satuan *trend linier* menjadi mm/tahun sebagai berikut.

Nilai SLR = $-0,00006 \times (1000/(9,9156/365))$
 = -2,21 mm/tahun

IV.2 Analisis Sea Level Rise

Satelit Altimetri mengamati permukaan perairan sesuai dengan *groundtrack* satelit yang ada yang terdiri dari lintasan naik (*ascending*) dan lintasan turun (*descending*) terhadap garis lintang. Kedua lintasan tersebut memiliki perpotongan pada satu titik yang disebut dengan titik *cross over*. Pengamatan yang dilakukan Satelit Altimetri pada titik *cross over* dilakukan pada waktu yang berbeda sehingga diperoleh dua hasil pengamatan pada titik

tersebut. Selisih hasil pengamatan yang didapatkan dari lintasan naik dan lintasan turun tersebut dinamakan *difference height*. Fenomena *difference height* terjadi diakibatkan oleh waktu pengamatan *ascending pass* dan *descending pass* yang berbeda, dan kondisi perairan di sekitar titik pengamatan yang menyebabkan perubahan permukaan laut secara *abnormal*. Data *difference height sea level rise* pada setiap titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Selisih *sea level rise* pada titik pengamatan

No	Lokasi Pengamatan	Ascending Pass	Descending Pass	Selisih (mm)
1	Perairan Aceh	10,8	14,4	3,6
2	Perairan Mentawai	21,24	23,04	1,8
3	Perairan Bengkulu	-2,16	21,6	23,76

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 2, dapat diketahui laju *sea level rise* tertinggi terjadi pada Perairan Mentawai yang memiliki nilai rata-rata sebesar +22,64 mm/tahun dan laju *sea level rise terendah* terjadi pada Perairan Bengkulu yang memiliki nilai rata-rata +10,12 mm/tahun.

Hasil pengamatan Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera menunjukkan terjadinya *sea level rise* kecuali pada Perairan Bengkulu *descending pass* 90. *Descending pass* 90 menunjukkan bahwa permukaan laut Bengkulu mengalami laju penurunan sebesar 2,21 mm/tahun. Hal ini terjadi dikarenakan adanya data error, data NaN dan fenomena alam yang terjadi di Perairan Bengkulu selama periode 2011-2014.

Fenomena alam berupa gempa bumi yang terjadi di Perairan Bengkulu, data kosong dan data error pada pengamatan *sea level anomaly* mempengaruhi nilai *sea level rise* yang diamati oleh Satelit Altimetri Jason-2. Gempa bumi mengakibatkan terjadinya perubahan ketinggian permukaan laut secara tidak beraturan yang dapat mempengaruhi nilai *sea level anomaly*, dan nilai data error dan data NaN pada pengamatan *sea level anomaly* mengakibatkan terjadinya kekosongan pada nilai *sea level anomaly* tersebut menyebabkan perubahan pada nilai *trend linier* hasil pengamatan sehingga nilai *trend* bernilai negatif.

IV.3 Hasil Pengamatan Komponen Pasang Surut

1. Perairan Aceh

Nilai komponen pasang surut pada *ascending pass* 27 dan *descending pass* 14 dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut ini.

Tabel 3 Komponen Pasang Surut *Ascending Pass* Perairan Aceh

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,06588
M2	163,29314	0,22946
S2	333,27259	0,09624

K2	48,44130	0,07184
N2	307,56803	0,05144
K1	301,64690	0,13137
O1	72,74844	0,03601
P1	315,51130	0,05418

Tabel 4 Komponen Pasang Surut *Descending Pass* Perairan Aceh

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,06662
M2	41,53640	0,24126
S2	216,26199	0,08981
K2	75,25557	0,05834
N2	105,52657	0,04771
K1	145,38121	0,04583
O1	125,33269	0,03669
P1	240,14382	0,04207

2. Perairan Mentawai

Nilai komponen pasang surut pada *ascending pass* 001 dan *descending pass* 90 dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5 Komponen Pasang Surut *Ascending Pass* Perairan Mentawai

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,07098
M2	232,52954	0,25562
S2	237,71354	0,12212
K2	75,73160	0,01383
N2	114,80706	0,08592
K1	162,92592	0,12137
O1	201,54104	0,07445
P1	162,87640	0,05777

Tabel 6 Komponen Pasang Surut *Descending Pass* Perairan Mentawai

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,08604
M2	157,42437	0,26583
S2	211,12833	0,12878
K2	145,37512	0,00851
N2	351,77750	0,06494
K1	321,76815	0,09963
O1	292,95157	0,05844
P1	58,41350	0,05635

3. Perairan Bengkulu

Nilai komponen pasang surut Perairan Bengkulu pada periode 2011-2014 ditentukan dengan menghitung analisis harmonik metode kuadrat terkecil menggunakan data Satelit Altimetri. Nilai komponen pasang surut pada *ascending pass* 77 dan *descending pass* 90 dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7 Komponen Pasang Surut *Ascending Pass* Perairan Bengkulu

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,05492
M2	163,05657	0,27009
S2	186,75979	0,11453
K2	79,82122	0,04606
N2	358,23106	0,06681
K1	152,83132	0,11317
O1	103,19408	0,07757
P1	97,61382	0,04365

Tabel 8 Komponen Pasang Surut *Descending Pass* Perairan Bengkulu

Komponen	Fase (°)	Amplitudo (m)
Z0	-	0,07360
M2	166,22853	0,29661
S2	211,68297	0,12961
K2	59,91309	0,05765
N2	182,26563	0,07965
K1	345,95333	0,14103
O1	306,41501	0,09250
P1	294,85734	0,04926

IV.4 Analisis Tipe Pasang Surut

Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera berbatasan dengan Samudera Hindia yang memiliki tipe pasang surut yang dominan campuran condong harian ganda (*mixed, mainly semidiurnal*). Analisis tipe pasang surut dilakukan dengan cara menghitung nilai bilangan *formzhal*. Tipe pasang surut diketahui dengan menganalisis nilai bilangan *formzhal* sesuai dengan kriteria yang sudah ditentukan. Hasil perhitungan bilangan *formzhal* dan elevasi muka air laut adalah sebagai berikut.

1. Perairan Aceh

$$(F) = (A_{K1} + A_{O1}) / (A_{M2} + H_{S2})$$

$$= (0,08860 + 0,03635) / (0,23536 + 0,09302)$$

$$= 0,38049$$

2. Perairan Mentawai

$$(F) = (A_{K1} + A_{O1}) / (A_{M2} + H_{S2})$$

$$= (0,1105 + 0,0664) / (0,2607 + 0,1254)$$

$$= 0,45819$$

3. Perairan Bengkulu

$$(F) = (A_{K1} + A_{O1}) / (A_{M2} + H_{S2})$$

$$= (0,1271 + 0,0850) / (0,2834 + 0,1221)$$

$$= 0,52324$$

Samudera Hindia memiliki tipe pasang surut *mixed, mainly semidiurnal* yang memiliki nilai bilangan *formzhal* pada *range* 0,25 sampai 1,50. Berdasarkan perhitungan nilai bilangan *formzhal* pada setiap titik penelitian didapat nilai bilangan *formzhal* pada Perairan Aceh sebesar 0,38049; nilai bilangan *formzhal* pada Perairan Mentawai sebesar 0,45819; dan nilai bilangan *formzhal* pada Perairan Bengkulu sebesar 0,52324. Nilai tersebut sesuai dengan kriteria tipe pasang surut Samudera Hindia

dan menandakan bahwa data komponen pasang surut yang dihasilkan melalui pengamatan Satelit Altimetri memiliki kesesuaian dengan tipe pasang surut lokasi penelitian.

IV.5 Hasil Uji Chi-Square

Uji *chi-square* dilakukan untuk melakukan pengecekan kesalahan dalam proses pengolahan data. Data yang telah lulus uji variansi dapat dinyatakan sebagai hasil pengolahan akhir.

Tabel 9 Hasil uji *chi-square*

Lokasi	Pass	Batas		Hasil Uji Chi-Square	Hasil
		Atas	Bawah		
Aceh	14	111,24226	60,53981	96,15562	Lulus
	27	125,00007	70,78282	102,95458	Lulus
Mentawai	1	84,47644	41,30314	71,49662	Lulus
	90	103,15811	54,62336	78,74670	Lulus
Bengkulu	77	114,69295	63,08935	92,98217	Lulus
	90	89,17714	44,60299	67,31877	Lulus

Berdasarkan Tabel 9, perhitungan uji *chi-square* memenuhi kriteria batas yang telah ditentukan. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan nilai uji *chi-square* berada diantara batas atas dan batas bawah yang dihasilkan. Perhitungan analisis harmonik yang telah lulus uji *chi-square* dapat dinyatakan sebagai hasil pengolahan akhir.

V. Penutup

V.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian analisis *sea level rise* dan komponen pasang surut dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2* periode 2011-2014 pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengamatan permukaan laut dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2* periode 2011-2014 menunjukkan adanya fenomena *sea level rise* pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan rata-rata nilai kenaikan sebesar +15,22 mm/tahun.
2. Pengamatan *trend linier* yang dilakukan dengan menggunakan data Satelit Altimetri *Jason-2* pada tahun 2011-2014 menunjukkan bahwa *trend linier* kenaikan permukaan laut rata-rata tertinggi terdapat pada Perairan Mentawai dengan nilai *trend linier* sebesar +22,64 mm/tahun dan *trend linier* kenaikan permukaan laut rata-rata terendah terdapat pada Perairan Bengkulu dengan nilai *trend linier* sebesar +10,12 mm/tahun.
3. Komponen pasang surut pada daerah Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera dengan pengamatan Satelit Altimetri *Jason-2* selama tahun 2011-2014 menghasilkan nilai amplitudo M2 rata-rata sebesar 0,25981 m, nilai amplitudo S2 rata-rata sebesar 0,11351 m, nilai amplitudo K2 rata-rata sebesar 0,04270 m, nilai amplitudo N2 rata-rata sebesar 0,06608 m, nilai amplitudo K1 rata-rata sebesar 0,10873 m, nilai amplitudo O1 rata-rata sebesar 0,06261 m, nilai amplitudo P1 rata-rata sebesar 0,05055 m, dan nilai elevasi HHWL rata-

rata sebesar 0,70759 m, nilai elevasi MHWL rata-rata sebesar 0,50083 m, nilai elevasi rata-rata MSL sebesar 0,06967 m, nilai elevasi rata-rata MLWL sebesar -0,36148 m, nilai elevasi CDL rata-rata sebesar -0,47500 m, nilai elevasi LLWL rata-rata sebesar -0,56825 m.

V.2. Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diajukan antara lain sebagai berikut:

1. Diperlukan *time series* pengamatan *sea level anomaly* yang lebih panjang untuk mendapatkan nilai *trend linier* yang lebih teliti dan mendapatkan selisih nilai *trend* dan nilai amplitudo komponen antar *pass* yang lebih akurat.
2. Pada penelitian *sea level rise* dan diperlukan data pendukung yang berisi tentang informasi kejadian fenomena alam seperti gempa bumi, badai *el nino* dsb pada kurun waktu penelitian yang telah ditentukan. Hal ini bertujuan untuk menganalisis lebih lanjut pengaruh fenomena alam tersebut terhadap nilai *sea level rise*.
3. Diperlukan adanya tindakan pencegahan agar wilayah pesisir pantai dan pulau-pulau pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera tidak mengalami pengurangan luas daratan, diantaranya dengan membangun pemecah gelombang pada daerah pesisir pantai dan melakukan penanaman bakau pada daerah pesisir untuk menjaga stabilitas garis pantai.

Daftar Pustaka

- Bianchi, M., dkk. 1999. *A Comparison of Methods for Trend Estimation*. Oxford University, Department of Mathematics. UK.
- Bindoff, N.I., et al. 2007. *Observations : Oceanic Climate Change and Sea Level*. IPCC Fourth Assessment Report. Australia.
- CNES. 2015. *Present Mission Jason-2 Instruments*. <http://www.avisio.altimetry.fr/en/missions/present-missions/jason-2/instruments.html>. Diunduh (*Download*) pada tanggal 23 November 2015.
- Hastho, W., Sorja K. Dan Yunianto M. 2012. *Analisa Sea Level Rise Data Satelit Altimetri Topex/Poseidon, Jason-1 dan Jason-2 di Perairan Laut Jawa Periode 2000 - 2010*. Tugas Akhir Universitas Sebelas Maret. Solo.
- Pangesti, A.W., 2012. *Pengaruh Lama Pengamatan Data Pasang Surut Terhadap Nilai Muka Surutan Peta*. Tugas Akhir Teknik Geodesi Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.

- Pariwono, J.I. 1989. *Kondisi Pasang Surut di Indonesia*. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Jakarta.
- Soeprapto. 1999. *Pasang Laut dan Chart Datum*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Seeber, G. 1993. *Satellite Geodesy, Foundations, Methods and Applications*. Walter de Gruyter. Berlin.
- Unimelb. 2015. *Chi-square statistical test*. <http://www.sli.unimelb.edu.au>. Diunduh (*download*) pada tanggal 15 September 2015.
- Watson, C.S., dkk. 2015. *Unabated Global Mean Sea Level Rise Over The Satellite Altimeter Era*. Nature Climate Change. Australia.