

## PERBANDINGAN KOMPONEN PASANG SURUT YANG DIPEROLEH MELALUI PENGUKURAN *TIDE GAUGE* DAN SATELIT ALTIMETRI

### THE COMPARISON OF TIDE COMPONENTS DERIVED BY TIDE GAUGE MEASUREMENT AND SATELLITE ALTIMETRY

Eko Yuli Handoko\*, Muhammad Aldila Syariz, Muhammad Hanan Ashiddiqi

Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

\*Korespondensi: [ekoyh@geodesy.its.ac.id](mailto:ekoyh@geodesy.its.ac.id)

#### ABSTRACT

Tidal variations, which result from the gravitational forces imposed by celestial bodies such as the sun and moon on the earth's masses of water, exhibit recurring alterations in the levels of the oceans. The conventional approach for monitoring tides entails the use of tidal gauges, however, satellite altimetry offers an alternate means of measurement. Tide gauges provide accurate measurements, albeit their effectiveness is contingent upon their specific geographical placement. On the other hand, altimetry satellites provide worldwide coverage, but with less temporal resolution. A least squares harmonic analysis is employed to examine tidal components using altimetry satellites. Nevertheless, this approach has a diminished temporal resolution in comparison to tide gauges. The present work aims to extract sea surface height data of the Jason-3 altimetry satellites to estimate sea surface heights, and subsequently compares these estimates with human tidal gauge readings. The study centers on the measuring of amplitude and phase of individual tidal components. The findings of this study reveal that the K1 tidal component demonstrates the biggest average difference, as measured by the root mean square error (RMSE), with a value of 0.360 m.

Keywords: least squares, satellite altimetry, sea surface height, tides

#### ABSTRAK

Pasang surut adalah fluktuasi muka air laut sebagai fungsi waktu karena adanya gaya tarik benda-benda di langit, terutama matahari dan bulan terhadap massa air laut di bumi. Selain dengan adanya pengamatan tradisional menggunakan *tide gauge*, komponen pasang surut dapat ditentukan menggunakan satelit altimetri. Penggunaan *tide gauge*, hasil ekstraksi komponen pasang surut hanya dapat dilakukan secara akurat karena memiliki resolusi temporal yang sangat baik meskipun hanya tersedia pada titik-titik stasiun tersebut didirikan saja. Hal ini berkebalikan dengan yang menggunakan satelit altimetri. Data yang didapatkan dari satelit altimetri perlu diolah agar mendapatkan nilai *sea surface height* yang selanjutnya digunakan untuk penentuan komponen pasang surut dengan analisis harmonik metode kuadrat terkecil pada banyak titik yang berada di permukaan bumi. Akan tetapi, resolusi temporal yang lebih rendah daripada *tide gauge* juga menjadi batasan dalam pengestraksian komponen pasut. Tujuan penelitian adalah mengekstraksi *sea surface height* data satelit altimetri Jason-3 dan membandingkan hasil ekstraksi tersebut dengan pengamatan manual. Hasil dari penelitian ini adalah nilai amplitudo dan fase dari tiap komponen pasang surut. Kemudian dilakukan perbandingan dengan hasil komponen dari data pengamatan stasiun pasang surut. Didapatkan bahwa perbedaan rata-rata (RMSE) terbesar sebesar 0,360 m pada komponen pasang surut K1 dan RMSE terkecil yaitu sebesar 0,003 m pada komponen pasang surut M4.

Kata kunci: metode kuadrat terkecil, pasang surut, satelit altimetri, *sea surface height*

## PENDAHULUAN

Pasang surut adalah naik turunnya permukaan air laut yang dapat diramalkan dalam fungsi waktu dengan tarikan gravitasi benda langit, terutama matahari dan bulan pada lautan di bumi, menjadi faktor pembangkitnya (Triatmodjo 1999). Dalam peramalan pasang surut ini, tarikan gravitasi benda langit ini dapat direpresentasikan dalam bentuk komponen amplitudo dan beda fase dari masing-masing tarikan gravitasi benda langit; yaitu *principal lunar* (M2), *principal solar* (S2), *larger lunar elliptic* (N2), *luni solar semi diurnal* (K2), *luni solar diurnal* (K1), *principal lunar diurnal* (O1), *principal solar diurnal* (P1), *main lunar* (M4), dan *main luni-solar* (MS4). Peramalan dari komponen penyusun pasang surut ini dapat ditentukan dengan analisis harmonik dengan metode kuadrat terkecil, dengan dasar bahwa pasang surut yang terjadi adalah superposisi atau penjumlahan berbagai amplitudo dan beda fase dari masing-masing komponen pembangkit pasang surut (Gumelar *et al.* 2016). Pasang surut air laut dapat diukur dengan beberapa alat, mulai dari yang paling sederhana yaitu pengamatan manual dengan membaca skala pada rambu ukur, sampai dengan menggunakan *automatic tide gauge*. Namun, instrumen ini hanya dapat mengukur pasang surut di sekitar garis pantai.

Perkembangan teknologi saat ini, pasang surut dapat ditentukan menggunakan satelit altimetri (Safi'i *et al.* 2018). Munculnya altimetri satelit benar-benar revolusioner. Altimetri satelit menawarkan untuk pertama kalinya sarana untuk memperkirakan pasang surut di lautan global (Fu dan Cazenave 2001). Satelit altimetri menangkap fenomena permukaan laut dari hasil pengukuran jarak permukaan laut ke satelit (Abidin 2001). Salah satu satelit altimetri yang masih ada hingga saat ini adalah Jason-3. Satelit Jason-3 diluncurkan pada 17 Januari 2016 dengan misi melanjutkan operasi observasi oseanografi yang sebelumnya dilakukan oleh Jason-2, Jason-1, dan TOPEX/Poseidon. Jason-3 memiliki periode pengulangan sekitar 9,99 hari atau singkatnya 10 hari dengan 254 lintasan per-siklus (CNES *et al.* 2018).

Penelitian tentang pasang surut menggunakan *tide gauge* yang sudah pernah dilakukan adalah analisis harmonik pasang surut dari data pengamatan

oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di Pulau Gili Raja Kabupaten Sumenep pada bulan April tahun 2015 menggunakan metode kuadrat terkecil (Prayogo 2021). Penelitian lain yang juga pernah dilakukan adalah analisis pasang surut yang didapatkan dari data pengamatan pasang surut di Pesisir Pantai Pancer, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember selama 15 hari, dari tanggal 3-17 Oktober 2019 dengan metode *admiralty* (Ryanto *et al.* 2022). Kedua penelitian di atas menghasilkan nilai amplitudo dan nilai keterlambatan fase dari komponen harmonik M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, M4, dan MS4. Wilayah area dari kedua penelitian di atas berada di wilayah perairan Jawa. Dari penelitian-penelitian tersebut, belum ada yang membandingkan secara langsung komponen pasang surut yang diperoleh melalui pengamatan *tide gauge* dengan satelit altimetri di wilayah perairan Indonesia bagian timur. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengekstraksi *sea surface height* data satelit altimetri Jason-3 dan membandingkan komponen pasang surut *principal lunar* (M2), *principal solar* (S2), *larger lunar elliptic* (N2), *luni solar semi diurnal* (K2), *luni solar diurnal* (K1), *principal lunar diurnal* (O1), *principal solar diurnal* (P1), *main lunar* (M4), dan *main luni-solar* (MS4) yang diperoleh melalui pengamatan *tide gauge* dengan satelit altimetri dari tahun 2016-2021. Hal ini dilakukan mengingat bahwa pengamatan *tide gauge* dapat dilakukan pada rentang waktu yang sangat padat akan tetapi bersifat *stationary*, yang dimaksudkan bahwa data hanya berada pada titik dimana stasiun itu didirikan. Selain itu, pengamatan menggunakan satelit altimetri memang memberikan opsi untuk dapat mengekstraksi semua komponen pasut dengan resolusi spasial yang lebih padat, meskipun secara temporal masih kurang baik daripada menggunakan pengamatan *tide gauge*.

## METODE PENELITIAN

### Lokasi penelitian

Lokasi penelitian ini berada di perairan Indonesia sebelah timur yang secara spesifik terletak pada 4 titik (dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1). Perairan Indonesia bagian timur merupakan pintu masuk utama perpindahan massa air dari Samudera Pasifik menuju Samudera

Hindia. Lokasi penelitian ini berada di titik stasiun pengamatan pasang surut Badan Informasi Geospasial yang berada di wilayah perairan Indonesia bagian timur. Ada sekitar 50 lebih stasiun pasang surut yang berada di wilayah perairan Indonesia bagian timur dan dipilih empat titik lokasi stasiun pasang surut yang tersebar di wilayah laut Indonesia bagian timur. Stasiun pasang surut Ambon berada di wilayah Laut Banda, Ternate di wilayah Laut Maluku, Tahuna di wilayah Laut Sulawesi, dan Sape di wilayah Laut Flores.

**Data pasang surut Badan Informasi Geospasial**

Data pasang surut *tide gauge* dalam penelitian ini adalah data yang didapatkan dari pengamatan stasiun pasang surut milik Badan Informasi Geospasial. Data yang digunakan adalah data pada stasiun pasang surut Ambon, Ternate, Tahuna,

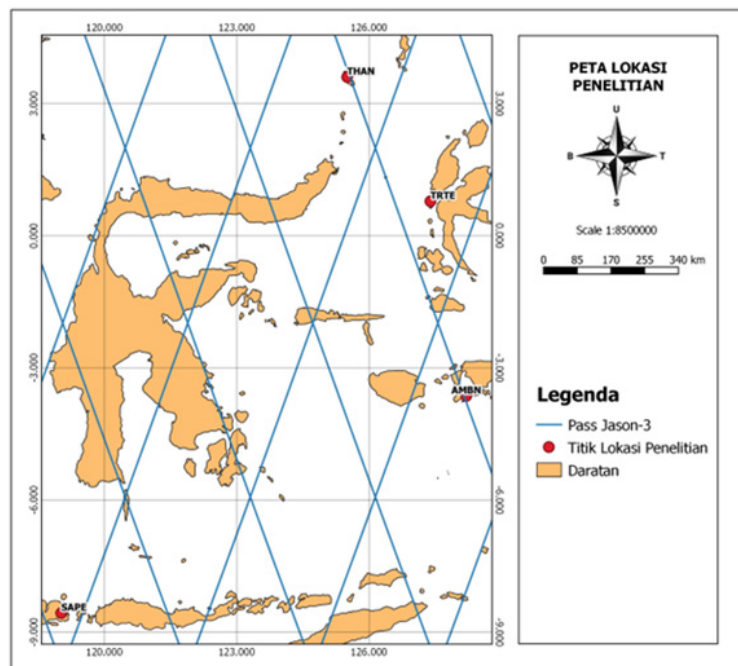
dan Sape dari rentang waktu Januari 2016 sampai Desember 2021. Data pasang surut ini merupakan data dengan interval pengambilan data setiap 1 jam.

**Data altimetri**

Data altimetri yang digunakan adalah data Jason-3 tahun 2016-2021 yang berasal dari *Radar Altimeter Database System* (RADS). Pencuplikan data dari satelit Jason-3 di suatu lokasi yang sama adalah setiap selang waktu 9,9156 hari. Rentang waktu tersebut dikenal dengan istilah *cycle*. Total ada 217 *cycle* dari tahun 2016-2021. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi konversi data, perhitungan *Sea Surface Height* (SSH), penentuan SSH di titik normal, periode *aliasing*, analisis harmonik, pembuatan peta pasang surut (*co-tidal chart*), penentuan tipe pasang surut, korelasi, dan uji akurasi.

Tabel 1. Koordinat lokasi penelitian di perairan Indonesia bagian timur

| No | Koordinat Geografis            | Lokasi  |
|----|--------------------------------|---------|
| 1  | 3°38'20,61"LS, 128°12'1,44"BT  | Ambon   |
| 2  | 0°46'54,23"LU, 127°23'17,88"BT | Ternate |
| 3  | 3°36'8,12"LU, 125°30'5,75"BT   | Tahuna  |
| 4  | 8°34'7,31"LS, 119° 1'11,99"BT  | Sape    |



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di perairan Indonesia bagian timur

## Perhitungan SSH

Perhitungan SSH (*Sea Surface Height*) dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut (Handoko *et al.* 2017):

$$h_{SSH} = H - R - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{iono} - \Delta R_{SSB} - \Delta R_{DAC} - \Delta R_{poltides} - \Delta R_{solidites}$$

Dalam hal ini:

- $h_{SSH}$  = Tinggi permukaan laut di atas elipsoid/SSH (m)
- $H$  = Tinggi satelit di atas elipsoid (m)
- $R$  = Jarak observasi antenna altimeter satelit dengan permukaan air sementara (m)
- $\Delta R_{dry}$  = Koreksi troposfer kering untuk gas kering seperti nitrogen dan oksigen
- $\Delta R_{wet}$  = Koreksi troposfer basah untuk uap air
- $\Delta R_{iono}$  = Koreksi ionosfer
- $\Delta R_{SSB}$  = Koreksi *sea state bias*
- $\Delta R_{DAC}$  = Koreksi dinamika atmosferik
- $\Delta R_{poltides}$  = Koreksi *pole tides*
- $\Delta R_{solidites}$  = Koreksi *solid earth tides*

## Penyesuaian data SSH secara manual dan berbasis satelit

Pengamatan satelit altimetri umumnya dilakukan di sepanjang lintasan dari setiap satelit tersebut. Oleh karena itu, untuk penyesuaian secara spasial, maka titik-titik yang diamati oleh Jason-3 akan diinterpolasi nilai SSH-nya pada titik normal sehingga nilai SSH yang digunakan dalam pengolahan data adalah nilai SSH di atas titik normal. Proses interpolasi yang digunakan adalah dengan metode IDW (*Inverse Distance Weight*). Interpolasi IDW akan memiliki pengaruh yang lebih besar jika nilai titik memiliki jarak yang lebih dekat dengan nilai dari titik yang dicari dan sebaliknya (Azpurua dan Ramos 2010). Didapatkan nilai SSH pada empat titik normal yaitu Ambon, Ternate, Tahuna, dan Sape.

Pengamatan pasut umumnya memiliki selang waktu  $\pm 1$  jam, sedangkan pengamatan satelit altimetri tercatat setiap selang waktu 9,9156 hari. Dengan pengamatan  $> 1$  jam, semakin tidak menggambarkan fenomena pasang surut yang sebenarnya. Hal ini dikatakan fenomena *aliasing* frekuensi komponen pasut, yaitu mengubah frekuensi asli komponen pasut menjadi frekuensi semu (alias), yakni nol,

setengah tahunan, atau tahunan. Periode *aliasing* perlu dilakukan untuk penyesuaian dari segi temporal. Perhitungan periode *aliasing* menggunakan persamaan sebagai berikut (Fu dan Cazenave 2000):

$$T_a = \left( \frac{2\pi\Delta T}{\Delta\phi} \right)$$

$$\Delta\phi = 2\pi(f\Delta T - [f\Delta T + 0,5])$$

Dimana:

- $T_a$  = Periode *aliasing*
- $\Delta\phi$  = Perbedaan fase antara dua sampel berturut-turut oleh satelit komponen pasang surut
- $f$  = Frekuensi
- $T$  = Periode

## Analisis harmonik

Penentuan nilai komponen pasut menggunakan analisis harmonik metode kuadrat terkecil. Analisis harmonik metode kuadrat terkecil melakukan perhitungan nilai komponen harmonik pasang surut yang meliputi perhitungan nilai amplitudo dan fase masing-masing komponen dari data satelit altimetri Jason-3 dan data pengamatan stasiun pasang surut. Analisis harmonik metode kuadrat terkecil dilakukan dengan persamaan sebagai berikut (Poerbandono dan Djunarsah 2005):

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t - \Phi_i)$$

Dalam hal ini:

- $y(t)$  = Tinggi muka laut sesaat
- $y_0$  = Tinggi muka laut rata-rata
- $A_i$  = Amplitudo komponen pasut
- $i$  dan  $n$  = Jumlah komponen pasut yang dilibatkan
- $\omega$  = Kecepatan sudut
- $\Phi_i$  = Beda fase

## Pembuatan *co-tidal chart*

Nilai amplitudo dan beda fase yang sudah didapatkan dari analisis harmonik kemudian dilakukan pembuatan *co-tidal charts* yang menunjukkan perbedaan nilai amplitudo dan visualisasi kontur beda fase dari lokasi pengamatan (Putra 2017). *Gridding* diterapkan untuk mengisi kekosongan data pada lintang dan bujur yang kosong. *Gridding* yang dipakai adalah dengan jarak  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ .

**Penentuan tipe pasang surut**

Nilai amplitudo yang sudah didapatkan dari analisis harmonik kemudian dapat digunakan untuk menentukan jenis atau tipe pasang surut dengan persamaan sebagai berikut (Ongkosongo 1989):

$$F = \frac{A_{K1} + A_{O1}}{A_{M2} + A_{S2}}$$

Dalam hal ini:

- F = Bilangan formzahl
- A<sub>K1</sub> = Amplitudo komponen harmonik K1
- A<sub>O1</sub> = Amplitudo komponen harmonik O1
- A<sub>M2</sub> = Amplitudo komponen harmonik M2
- A<sub>S2</sub> = Amplitudo komponen harmonik S2

Tipe pasut ditentukan berdasarkan rentang nilai F seperti pada Tabel 2 (Triatmodjo 2010). *Semidiurnal* atau pasang surut harian ganda yaitu dalam satu hari terdapat dua kali pasang dan dua kali surut. *Mixed prevailing semidiurnal* atau pasang surut campuran condong keharian ganda yaitu dalam satu hari terdapat dua kali pasang dan dua kali surut namun tinggi dan periodenya sangat berbeda. *Mixed prevailing diurnal* atau pasang surut campuran condong keharian tunggal yaitu dalam satu hari terdapat satu kali pasang dan satu kali surut tapi kadang-kadang terjadi dua kali pasang atau dua kali surut. *Diurnal* atau pasang surut harian tunggal yaitu dalam satu hari terdapat satu kali pasang dan satu kali surut.

**Korelasi dan uji akurasi**

Salah satu metode dalam perhitungan korelasi linier adalah Pearson. Korelasi merupakan indeks atau bilangan yang digunakan untuk mengukur keeratan (kuat, lemah, atau tidak ada) hubungan antar variabel. Untuk mengukur tingkat akurasi nilai komponen pasang surut dilakukan perhitungan nilai RMSE dengan persamaan sebagai berikut (Daher *et al.*

2015):

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{2} \left\{ [H_0 \cos(G_0) - H_m \cos(G_m)]^2 + [H_0 \sin(G_0) - H_m \sin(G_m)]^2 \right\} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dalam hal ini:

- N = Jumlah poin yang digunakan
- H<sub>0</sub> = Amplitudo satelit altimetri
- G<sub>0</sub> = Beda fase satelit altimetri
- H<sub>m</sub> = Amplitudo pengamatan *tide gauge*
- G<sub>m</sub> = Beda fase pengamatan *tide gauge*

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**SSH di titik normal**

SSH di atas titik normal yaitu pada titik lokasi stasiun pasut Ambon, Ternate, Tahuna, dan Sape dapat dilihat pada Tabel 3. Total ada 217 data *cycle* Jason-3 dari tahun 2016-2021. YF merupakan format waktu desimal berdasarkan angka tahun. Nilai-nilai di atas menunjukkan besaran SSH pada titik normal Ambon, Ternate, Tahuna, dan Sape dari *cycle* 1-217. Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa ketinggian muka air pada perairan Sape lebih tinggi dari pada ketinggian muka air pada perairan Ambon, Ternate, dan Tahuna. Hal ini dapat dilihat dimana SSH di perairan Sape bernilai di rentang 38-41, sedangkan di perairan lainnya berada pada rentang yang jauh lebih tinggi daripada itu.

**Perbandingan pasang surut *tide gauge* dengan SSH Jason-3**

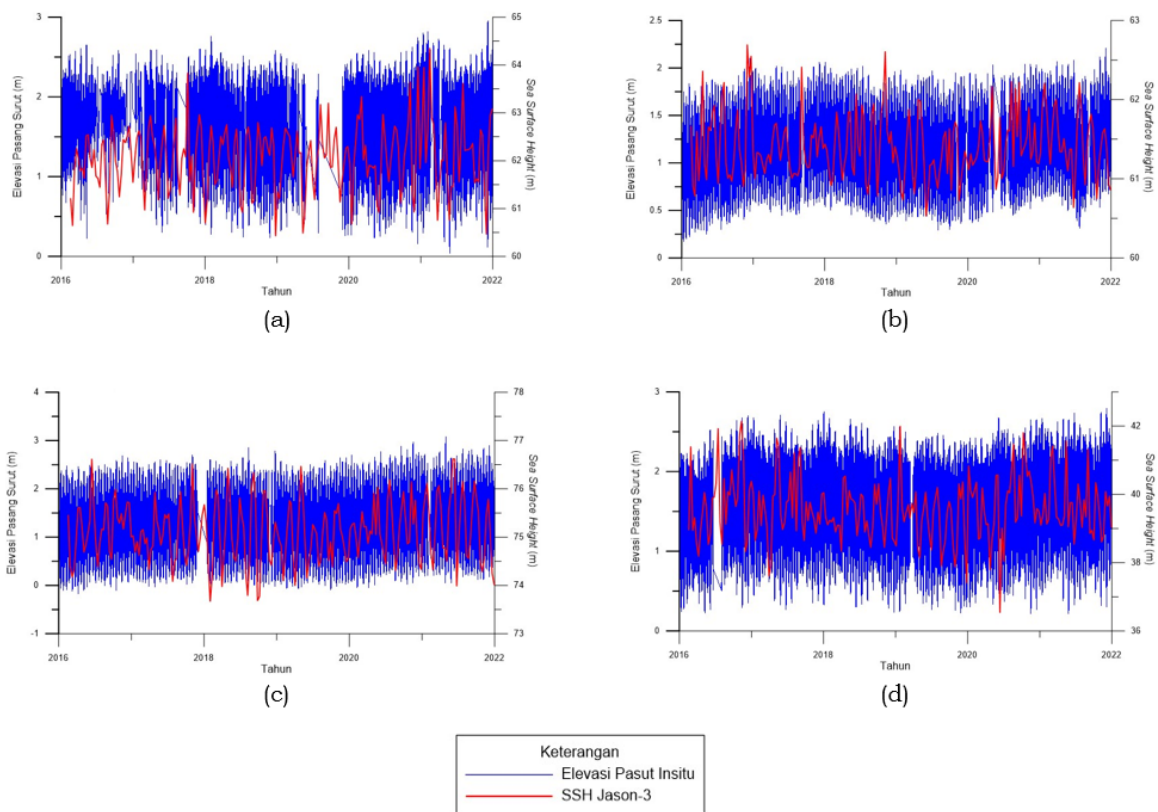
Data pengamatan pasang surut yang didapatkan dari Badan Informasi Geospasial dengan interval 1 jam diplot dengan nilai SSH di atas titik normal, dengan interval per-*cycle* Jason-3 yaitu 9,9 hari. Gambar 2 menunjukkan hasil grafik perbandingan antara pasang surut *tide gauge* (warna biru) dengan SSH Jason-3 (warna merah) pada empat titik lokasi yaitu Ambon, Ternate, Tahuna, dan Sape.

Tabel 2. Tipe pasut berdasarkan bilangan *formzahl*

| Nilai F        | Tipe Pasut                          |
|----------------|-------------------------------------|
| 0 ≤ F ≤ 0,25   | <i>Semidiurnal</i>                  |
| 0,25 < F ≤ 1,5 | <i>Mixed prevailing semidiurnal</i> |
| 1,5 < F ≤ 3    | <i>Mixed prevailing diurnal</i>     |
| F > 3          | <i>Diurnal</i>                      |

Tabel 3. Nilai SSH di titik normal

| CYCLE | YYF     | AMBN  | TRTE  | THAN  | SAPE  |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 2016,13 | 61,21 | 61,67 | 75,45 | 38,96 |
| 2     | 2016,16 | 60,65 | 60,90 | 74,41 | 41,39 |
| 3     | 2016,19 | 61,83 | 60,78 | 74,17 | 38,95 |
| 4     | 2016,21 | 62,25 | 61,60 | 74,32 | 39,32 |
| 5     | 2016,24 | 62,05 | 60,98 | 74,91 | 38,58 |
| 6     | 2016,27 | 61,79 | 61,37 | 75,61 | 38,19 |
| 7     | 2016,29 | 61,85 | 62,36 | 75,61 | 38,95 |
| 8     | 2016,32 | 61,63 | 61,18 | 75,21 | 39,46 |
| 9     | 2016,35 | 62,52 | 60,99 | 74,69 | 40,06 |
| 10    | 2016,37 | 62,54 | 61,66 | 74,85 | 39,63 |
| ...   | ...     | ...   | ...   | ...   | ...   |
| 210   | 2021,80 | 61,55 | 60,75 | 74,48 | 39,97 |
| 211   | 2021,83 | 62,65 | 61,18 | 74,28 | 39,37 |
| 212   | 2021,86 | 62,54 | 61,39 | 74,55 | 38,61 |
| 213   | 2021,88 | 61,46 | 61,58 | 75,44 | 38,78 |
| 214   | 2021,91 | 60,47 | 61,63 | 75,78 | 40,08 |
| 215   | 2021,94 | 62,23 | 61,40 | 75,06 | 39,66 |
| 216   | 2021,97 | 62,95 | 60,94 | 74,24 | 39,95 |
| 217   | 2021,99 | 63,08 | 60,86 | 74,02 | 39,04 |



Gambar 2. Perbandingan elevasi pasang surut *tide gauge* dengan SSH Jason-3. (a) Ambon, (b) Ternate, (c) Tahuna, dan (d) Sape

Pengamatan altimetri satelit harus sedapat mungkin berkorelasi dengan data pengukur pasang surut dalam jarak tertentu dari pengukur pasang surut untuk mendapatkan integrasi yang baik antara data altimetri dengan data alat ukur pasang surut (Høyer dan Andersen 2003). Untuk menguji korelasi temporal antara data altimetri dan alat pengukur pasang surut, data pengukur pasang surut dirata-ratakan dalam waktu 3 jam di sekitar pengamatan altimetri (Cheng *et al.* 2012). Korelasi antara elevasi pasang surut *tide gauge* dan SSH altimetri di setiap titik normal kemudian dihitung dengan menyesuaikan waktu sampling data dan didapatkan nilai korelasinya pada titik normal Ambon sebesar 0,254, Ternate sebesar 0,332, Tahuna sebesar 0,334, dan Sape sebesar 0,309. Nilai korelasi yang didapatkan termasuk korelasi rendah. Hal tersebut sangat wajar dikarenakan perbedaan metode pengukuran dan juga adanya data kosong pada pengamatan stasiun pasang surut *tide gauge*. Selain itu, perbedaan jumlah data (tahun 2016-2021) dari pengamatan pasang surut *tide gauge* terhadap satelit altimetri Jason-3 yang hanya 217 menjadi satu kendala dalam mengkorelasikan dua jenis data tersebut.

### Periode *aliasing*

Didapatkan nilai periode *aliasing* seperti pada Tabel 4. Nilai-nilai periode yang didapatkan tersebut selanjutnya digunakan untuk proses analisis harmonik untuk mendapatkan nilai amplitudo dan fase dari setiap komponen pasang surut. Analisis harmonik pengamatan pasut menggunakan periode  $T_{\text{asli}}$ , sedangkan analisis harmonik Jason-3 menggunakan periode  $T_{\text{aliasing}}$

dengan satuan hari.

### Hasil analisis harmonik

Perhitungan komponen pasut yang dihasilkan dari analisis harmonik metode kuadrat terkecil memperoleh 9 komponen pasut yang terdiri dari M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, M4, dan MS4 pada 4 titik pengamatan. Berikut adalah hasil analisis harmonik meliputi nilai amplitudo dan fase tiap komponen dari data satelit altimetri Jason-3 dan data *tide gauge*. Tabel 5 menunjukkan hasil perbandingan komponen pasang surut di lokasi Ambon. Tabel 6 menunjukkan hasil perbandingan komponen pasang surut di lokasi Ternate. Tabel 7 menunjukkan hasil perbandingan komponen pasang surut di lokasi Tahuna. Tabel 8 menunjukkan hasil perbandingan komponen pasang surut di lokasi Sape.

Berdasarkan Tabel 9 dapat diketahui bahwa amplitudo terkecil dari keempat titik lokasi pengamatan adalah komponen M4 kecuali pada lokasi Sape untuk pengamatan *tide gauge* nilai terkecilnya adalah komponen MS4. Hal tersebut menunjukkan bahwa komponen atau komponen pasut M4 dan MS4 memiliki pengaruh yang kecil terhadap pembentukan pasang surut dibanding dengan komponen pasut lainnya di empat titik lokasi pengamatan. Komponen M4 dan MS4 merupakan komponen *shallow water tide* atau komponen perairan dangkal. Komponen M4 menunjukkan fenomena dua kali kecepatan sudut M2 akibat pengaruh bulan di perairan dangkal, sedangkan komponen MS4 menunjukkan fenomena interaksi M2 dan S2 di perairan dangkal (Poerbandono dan Djunarsah 2005).

Tabel 4. Periode *aliasing* dari setiap komponen pasut

| Komponen Pasut | $T_{\text{asli}}$ | $T_{\text{aliasing}}$ |           |
|----------------|-------------------|-----------------------|-----------|
|                | (Jam)             | (Jam)                 | (Hari)    |
| M2             | 12,4206           | 1490,5622             | 62,1068   |
| S2             | 12                | 1409,8009             | 58,7417   |
| N2             | 12,6582           | 1189,9848             | 49,5827   |
| K2             | 11,9673           | 2076,3423             | 86,5143   |
| K1             | 23,9346           | 4152,6845             | 173,0285  |
| O1             | 25,8194           | 1097,2457             | 45,7186   |
| P1             | 24,0658           | 2134,0901             | 88,9204   |
| M4             | 6,2103            | 745,2811              | 31,0534   |
| MS4            | 6,1033            | 26748,2349            | 1114,5098 |

Tabel 5. Komponen pasut di lokasi Ambon

| Komponen Pasut | Jason-3       |          | Tide Gauge    |          |
|----------------|---------------|----------|---------------|----------|
|                | Amplitudo (m) | Fase (°) | Amplitudo (m) | Fase (°) |
| M2             | 0,356         | 68,298   | 0,071         | 245,867  |
| S2             | 0,308         | 283,194  | 0,049         | 314,159  |
| N2             | 0,525         | 222,134  | 0,010         | 62,153   |
| K2             | 0,142         | 76,540   | 0,028         | 329,879  |
| K1             | 0,163         | 218,187  | 0,097         | 18,859   |
| O1             | 0,161         | 106,336  | 0,066         | 155,589  |
| P1             | 0,140         | 244,719  | 0,018         | 84,597   |
| M4             | 0,002         | 314,701  | 0,002         | 189,696  |
| MS4            | 0,198         | 213,865  | 0,003         | 48,382   |

Tabel 6. Komponen pasut di lokasi Ternate

| Komponen Pasut | Jason-3       |          | Tide Gauge    |          |
|----------------|---------------|----------|---------------|----------|
|                | Amplitudo (m) | Fase (°) | Amplitudo (m) | Fase (°) |
| M2             | 0,539         | 88,776   | 0,057         | 335,482  |
| S2             | 0,470         | 304,298  | 0,078         | 221,606  |
| N2             | 0,082         | 244,255  | 0,004         | 175,734  |
| K2             | 0,207         | 92,409   | 0,020         | 234,014  |
| K1             | 0,227         | 226,547  | 0,077         | 313,993  |
| O1             | 0,025         | 127,333  | 0,050         | 345,666  |
| P1             | 0,203         | 260,247  | 0,017         | 125,262  |
| M4             | 0,001         | 23,506   | 0,001         | 286,250  |
| MS4            | 0,273         | 215,189  | 0,002         | 253,220  |

Tabel 7. Komponen pasut di lokasi Tahuna

| Komponen Pasut | Jason-3       |          | Tide Gauge    |          |
|----------------|---------------|----------|---------------|----------|
|                | Amplitudo (m) | Fase (°) | Amplitudo (m) | Fase (°) |
| M2             | 0,680         | 260,306  | 0,145         | 237,578  |
| S2             | 0,581         | 115,976  | 0,118         | 154,789  |
| N2             | 0,095         | 57,794   | 0,029         | 276,945  |
| K2             | 0,289         | 265,014  | 0,032         | 177,344  |
| K1             | 0,350         | 42,426   | 0,028         | 101,244  |
| O1             | 0,028         | 303,328  | 0,029         | 97,420   |
| P1             | 0,285         | 72,949   | 0,025         | 311,262  |
| M4             | 0,000         | 251,104  | 0,001         | 296,392  |
| MS4            | 0,433         | 34,544   | 0,001         | 256,870  |



Tabel 8. Komponen pasut di lokasi Sape

| Komponen Pasut | Jason-3       |          | Tide Gauge    |          |
|----------------|---------------|----------|---------------|----------|
|                | Amplitudo (m) | Fase (°) | Amplitudo (m) | Fase (°) |
| M2             | 0,223         | 277,185  | 0,248         | 239,604  |
| S2             | 0,195         | 133,934  | 0,040         | 165,346  |
| N2             | 0,344         | 80,148   | 0,032         | 81,892   |
| K2             | 0,865         | 276,924  | 0,012         | 26,304   |
| K1             | 0,972         | 48,327   | 0,078         | 56,084   |
| O1             | 0,108         | 329,734  | 0,062         | 342,875  |
| P1             | 0,850         | 84,530   | 0,045         | 196,574  |
| M4             | 0,003         | 213,023  | 0,007         | 311,530  |
| MS4            | 0,117         | 35,436   | 0,003         | 209,085  |

Tabel 9. Nilai amplitudo terendah dan tertinggi

| Titik Lokasi | Pengamatan | Nilai Amplitudo (m) |        |          |        |
|--------------|------------|---------------------|--------|----------|--------|
|              |            | Terkecil            |        | Terbesar |        |
| Ambon        | Jason-3    | M4                  | 0,0015 | N2       | 0,5253 |
|              | Tide Gauge | M4                  | 0,0023 | K1       | 0,0970 |
| Ternate      | Jason-3    | M4                  | 0,0006 | M2       | 0,5386 |
|              | Tide Gauge | M4                  | 0,0010 | S2       | 0,0779 |
| Tahuna       | Jason-3    | M4                  | 0,0002 | M2       | 0,6799 |
|              | Tide Gauge | M4                  | 0,0008 | M2       | 0,1446 |
| Sape         | Jason-3    | M4                  | 0,0033 | K1       | 0,9715 |
|              | Tide Gauge | MS4                 | 0,0028 | M2       | 0,2481 |

Berdasarkan Tabel 9 juga dapat diketahui bahwa amplitudo terbesar pada lokasi Ambon untuk pengamatan Jason-3 adalah komponen N2, sedangkan untuk pengamatan *tide gauge* adalah komponen K1. Pada lokasi Ternate amplitudo terbesar untuk pengamatan Jason-3 adalah komponen M2, sedangkan untuk pengamatan *tide gauge* adalah komponen S2. Pada lokasi Tahuna amplitudo terbesar baik dari pengamatan Jason-3 maupun *tide gauge* adalah komponen M2. Pada lokasi Sape amplitudo terbesar untuk pengamatan Jason-3 adalah komponen K1, sedangkan untuk pengamatan *tide gauge* adalah komponen M2. Adanya perbedaan nilai amplitudo terbesar di setiap lokasi disebabkan oleh adanya perbedaan tinggi muka air laut yang tidak merata. Variasi nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan tenaga pembangkit dari masing-masing komponen (Poerbandono dan Djunarsah 2005). Nilai fase yang didapatkan menunjukkan besar nilai dari perambatan gelombang dan arah perambatan gelombang masing-masing komponen harmonik.

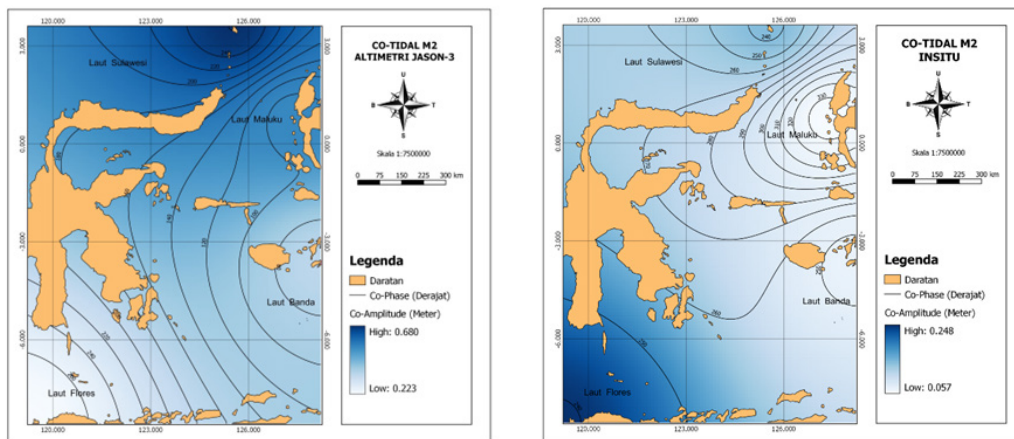
Adanya variasi nilai dan arah perambatan tersebut yang menggambarkan perbedaan respon di setiap lokasi terhadap gaya pembangkit pasang surut. Arah perambatan pada masing-masing komponen tersebut dapat dilihat dengan membandingkan nilai fase pada komponen yang sama di lokasi pengamatan yang berdekatan. Arah perambatan bergerak dari lokasi dengan nilai fase yang kecil ke lokasi yang memiliki nilai fase yang lebih besar (Febriansyah dan Handoko 2022), contohnya pada komponen pasang surut S2 nilai fase di Tahuna lebih kecil dari nilai fase Ternate, maka arah perambatan gelombang S2 bergerak dari Tahuna ke Ternate.

### Co-tidal charts

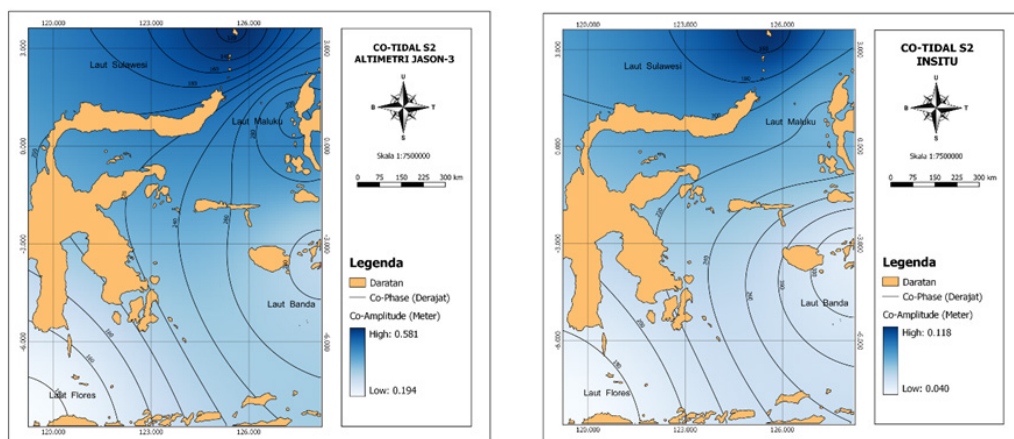
*Co-tidal chart* merupakan bagian dari peta laut yang memperlihatkan garis yang menghubungkan titik-titik di laut dengan nilai amplitudo dan fase yang sama. Peta pasang surut atau *co-tidal charts* dapat menunjukkan secara spasial perbedaan nilai amplitudo dari perubahan warna

atau gradasi warna biru. Selain itu *co-tidal charts* juga menunjukkan visualisasi kontur beda fase dari lokasi pengamatan. Pada Gambar 3 kiri menunjukkan *co-tidal chart* M2 dari pengamatan satelit altimetri Jason-3. Gambar tersebut menunjukkan komponen M2 memiliki nilai amplitudo minimum 0,223 m dan maksimum 0,680 m. Arah perambatan komponen M2 bergerak dari timur di wilayah Laut Banda menuju ke barat ke wilayah Laut Flores dan juga ke arah barat laut melewati Laut Maluku yang kemudian menuju Laut Sulawesi. Selain itu, Gambar 3 kanan menunjukkan *co-tidal chart* M2 dari pengamatan *tide gauge*. Gambar tersebut menunjukkan komponen M2 memiliki nilai amplitudo minimum 0,057 m dan maksimum 0,248 m. Arah perambatan komponen M2 ada yang bergerak dari barat di wilayah Laut Flores timur laut melewati Laut Banda menuju ke Laut Maluku. Selain itu perambatan juga bergerak dari arah utara yaitu dari Laut Sulawesi bergerak ke selatan menuju ke Laut Maluku.

Pada Gambar 4 kiri menunjukkan *co-tidal chart* S2 dari pengamatan satelit altimetri Jason-3. Gambar tersebut menunjukkan komponen S2 memiliki nilai amplitudo minimum 0,194 m dan maksimum 0,581 m. Arah perambatan komponen S2 bergerak dari barat di wilayah Laut Flores menuju ke timur ke Laut Banda kemudian menuju ke utara ke Laut Maluku. Selain itu, perambatan komponen S2 juga bergerak dari wilayah utara menyebar ke Laut Sulawesi dan juga ke Laut Maluku. Gambar 4 kanan menunjukkan *co-tidal chart* S2 dari pengamatan *tide gauge*. Gambar tersebut menunjukkan komponen S2 memiliki nilai amplitudo minimum 0,040 m dan maksimum 0,118 m. Selain itu, Gambar 4 menunjukkan bahwa pengaruh gravitasi matahari terhadap ketinggian muka air laut lebih besar di sekitar Laut Sulawesi dan Laut Maluku yang berada di sisi utara perairan Indonesia bagian timur daripada terhadap ketinggian muka air laut di sisi selatan dari kedua laut tersebut.



Gambar 3. *Co-tidal charts* M2 pada wilayah perairan Indonesia di sebelah timur diekstraksi menggunakan Jason-3 (kiri) dan *tide gauge* (kanan)



Gambar 4. *Co-tidal charts* S2 pada wilayah perairan Indonesia di sebelah timur diekstraksi menggunakan (kiri) Jason-3 dan (kanan) *tide gauge*

### Tipe pasang surut

Tipe pasut pada empat lokasi titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 10. Pada titik lokasi Ambon dan Sape hasil tipe pasang surut antara data pengamatan Jason-3 dengan pengamatan *tide gauge* sama yaitu *mixed semidiurnal*. Selain itu, untuk titik lokasi Ternate dan Tahuna, didapatkan hasil tipe pasang surut yang berbeda antara kedua jenis pengamatan.

### Korelasi dan akurasi

Perhitungan korelasi menghasilkan nilai koefisien korelasi antara nilai komponen pasang surut dari pengamatan *tide gauge* dengan nilai komponen pasang surut dari satelit altimetri Jason-3. Didapatkan nilai koefisien korelasi seperti yang dapat dilihat pada Tabel 11. Koefisien korelasi *pearson* yang didapatkan sangat bervariasi. Pada komponen S2, O1, P1, dan M4 korelasi yang didapatkan menunjukkan korelasi tinggi positif. Hal ini menunjukkan

bahwa proses ekstraksi keempat komponen tersebut dengan menggunakan pasang surut ataupun Jason-3 selaras. Pada komponen K2 dan MS4 korelasi yang didapatkan menunjukkan korelasi tinggi negatif. Komponen M2 berkorelasi negatif yang cukup berarti. Komponen K1 dan O1 korelasi yang didapatkan menunjukkan korelasi negatif yang sangat rendah. Hal ini menunjukkan ketidakkonsistenan pengeksraksian kelima komponen pasang surut tersebut dengan menggunakan pasang surut ataupun Jason-3.

Uji akurasi hasil analisis harmonik komponen pasut dari hasil satelit altimetri Jason-3 terhadap pengamatan pasang surut *tide gauge* dengan perhitungan RMSE. Didapatkan nilai RMSE dari setiap komponen pasang surut seperti yang dapat dilihat pada Tabel 12. Berdasarkan nilai RMSE tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai amplitudo maka semakin besar nilai RMSE-nya. Maka besarnya nilai RMSE berbanding lurus dengan nilai amplitudo suatu komponen.

Tabel 10. Tipe pasut dari empat titik lokasi berdasarkan bilangan Formzahl

| Titik Lokasi | Jason-3 |                          | Tide Gauge |                          |
|--------------|---------|--------------------------|------------|--------------------------|
|              | Nilai F | Tipe Pasut               | Nilai F    | Tipe Pasut               |
| Ambon        | 0,269   | <i>Mixed semidiurnal</i> | 1,362      | <i>Mixed semidiurnal</i> |
| Ternate      | 0,250   | <i>Semidiurnal</i>       | 0,946      | <i>Mixed semidiurnal</i> |
| Tahuna       | 0,300   | <i>Mixed semidiurnal</i> | 0,216      | <i>Semidiurnal</i>       |
| Sape         | 0,258   | <i>Mixed semidiurnal</i> | 0,486      | <i>Mixed semidiurnal</i> |

Tabel 11. Korelasi *pearson* tiap komponen pasang surut

| Komponen Pasut | Korelasi |
|----------------|----------|
| M2             | -0,461   |
| S2             | 0,966    |
| N2             | -0,036   |
| K2             | -0,783   |
| K1             | -0,028   |
| O1             | 0,826    |
| P1             | 0,989    |
| M4             | 0,980    |
| MS4            | -0,978   |

Tabel 12. Nilai RMSE tiap komponen pasang surut

| Komponen Pasut | RMSE (m) |
|----------------|----------|
| M2             | 0,321    |
| S2             | 0,265    |
| N2             | 0,225    |
| K2             | 0,338    |
| K1             | 0,360    |
| O1             | 0,058    |
| P1             | 0,338    |
| M4             | 0,003    |
| MS4            | 0,199    |

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Hasil analisis harmonik menunjukkan bahwa dari lokasi Ambon, Ternate, Tahuna, dan Sape yang memiliki nilai amplitudo terkecil yaitu pada komponen M4 dan MS4 (jenis komponen perairan dangkal) sedangkan untuk amplitudo terbesar yaitu pada komponen M2, S2, N2, K1 (bervariasi didominasi oleh komponen *semidiurnal*). Hal ini menunjukkan bahwa komponen *semidiurnal* memiliki pengaruh yang lebih besar dalam pembentukan pasang surut sehingga didapatkan tipe pasut pada keempat lokasi tersebut adalah tipe *semidiurnal* dan *mixed prevailing semidiurnal*. Korelasi komponen pasang surut Jason-3 terhadap pasang surut *tide gauge* yang terkuat yaitu komponen P1 dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,989 sedangkan untuk korelasi terlemah adalah komponen K1 dengan nilai koefisien korelasi -0,028. Untuk nilai RMSE komponen pasang surut terbesar adalah komponen K1 sebesar 0,360 m dan terkecil adalah komponen M4 sebesar 0,003 m. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang tidak signifikan di antara pengeksktraksian komponen pasut dengan menggunakan data *tide gauge* dan Jason-3.

### Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yang serupa adalah untuk menambah titik pengamatan dengan persebaran yang merata agar memperoleh hasil *co-tidal charts* yang lebih baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada TUDelft dan NOAA selaku pihak pengelola RADS (*Radar Altimetry Database System*) sebagai sumber data yang digunakan dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada instansi BIG (Badan Informasi Geospasial) selaku penyedia data pengamatan pasang surut.

## DAFTAR PUSTAKA

Abidin H. 2001. *Geodesi Satelit*. Jakarta (ID): PT. Pradnya Paramita.  
Azpurua M, Ramos KD. 2010. A Comparison of Spatial Interpolation

Methods for Estimation of Average Electromagnetic Field Magnitude. *Progress in Electromagnetics Research M*. 14: 135-145.

Cheng Y, Andersen OB, Knudsen P. 2012. Integrating Non-Tidal Sea Level Data from Altimetry and Tide Gauges for Coastal Sea Level Prediction. *Advances in Space Research*. 50(8): 1099-1106.

CNES, EUMETSAT, NASA, NOAA. 2018. Jason-3 Products Handbook. Toulouse, France.

Daher VB, Paes RCOV, França GB, Alvarenga JBR, Teixeira GLG. 2015. Extraction of Tide Constituents by Harmonic Analysis Using Altimetry Satellite Data in the Brazilian Coast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 32(3): 614-626. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00091.1>.

Febriansyah MN, Handoko EY. 2022. Perbandingan Komponen Pasang Surut dengan Analisis Harmonik antara Satelit Altimetri Jason-2 dan Jason-3 dengan Stasiun Pasang Surut pada Perairan Jawa. *Geoid Journal of Geodesy and Geomatics*. 18(1): 20-33.

Fu LL, Cazenave A. 2000. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. Amsterdam (NL): Elsevier.

Gumelar J, Sasmito B, Amarrohman FJ. 2016. Analisis Harmonik dengan Menggunakan Teknik Kuadrat Terkecil untuk Penentuan Komponen-Komponen Pasut di Wilayah Laut Selatan Pulau Jawa dari Satelit Altimetri Topex/Poseidon dan Jason-1. *Jurnal Geodesi Undip*. 5(1): 194-203.

Handoko EY, Maria JF, Clara L. 2017. Assessment of Altimetric Range and Geophysical Corrections and Mean Sea Surface Models—Impacts on Sea Level Variability around the Indonesian Seas. *Remote Sensing*. 9(2): 102. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020102>.

Høyer JL, Andersen OB. 2003. Improved Description of Sea Level in the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 108(C5): 32-(1-11).

Ongkosongo OSR. 1989. *Pasang Surut*. Jakarta (ID): Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi.

Poerbandono, Djunarsjah E. 2005. *Survei Hidrografi*. Bandung (ID): PT. Refika

- Aditama.
- Prayogo LM. 2021. Metode Kuadrat Terkecil untuk Analisis Konstanta Harmonik Pasang Surut Air Laut di Pulau Gili Raja, Kabupaten Sumenep, Madura. *Pena Akuatika: Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*. 20(1): 72-79.
- Putra AYN. 2017. Pembuatan *Co-Tidal Charts* Perairan Laut Jawa [Skripsi]. Surabaya (ID): Institut Teknologi Sepuluh November.
- Ryanto NA, Wiyono RUA, Hidayah E. 2022. Studi Peramalan Pasang Surut di Pesisir Pantai Pancer Kecamatan Puger, Kabupaten Jember. *Maspari Journal: Marine Science Research*. 14(1): 1-13.
- Safi'i AN, Syetiawan A, Kusuma HA, Lumban-Gaol YA, Rudiastuti AW, Oktavian N. 2018. Optimalisasi Data Satelit Altimetri untuk Menghitung Komponen Harmonik Pasang Surut. *Seminar Nasional Geomatika 2018: Penggunaan dan Pengembangan Produk Informasi Geospasial Mendukung Daya Saing Nasional*. 777-786.
- Triatmodjo B. 1999. *Teknik Pantai*. Yogyakarta (ID): Beta Offset.
- Triatmodjo B. 2010. *Perencanaan Pelabuhan*. Yogyakarta (ID): Beta Offset.