

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Pasang Surut Laut**

Dalam survei hidrografi, salah satu bagian yang fundamental adalah pengamatan pasang surut air laut. Penjelasan tentang pengertian pasut, gaya pembangkit pasut, konstanta harmonik pasut, tipe serta metode pengamatan pasut akan ini akan dijabarkan pada pembahasan berikut ini.

##### **2.1.1. Pengertian Pasang Surut Laut**

IHO (*International Hydrography Organization*) mendefinisikan pasang surut sebagai periode pasang dan surut dari laut, teluk, dan lain-lain, yang merupakan prinsip dari daya tarik gravitasi dari bulan dan matahari terhadap rotasi bumi. [8]. Sedangkan pasang surut adalah fenomena naik turunnya permukaan air laut yang utamanya disebabkan oleh gravitasi bulan dan matahari [9]. Dari kedua teori yang diatas, maka dapat disimpulkan bahwa pasang surut merupakan gerakan naik turunnya permukaan air laut yang terjadi secara periodik yang utamanya diakibatkan oleh gravitasi benda-benda langit tidak hanya menyebabkan pasut laut tetapi juga mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk bumi dan atmosfer. Pasang surut yang terjadi di bumi ada tiga macam, yaitu:

1. Pasang surut atmosfer

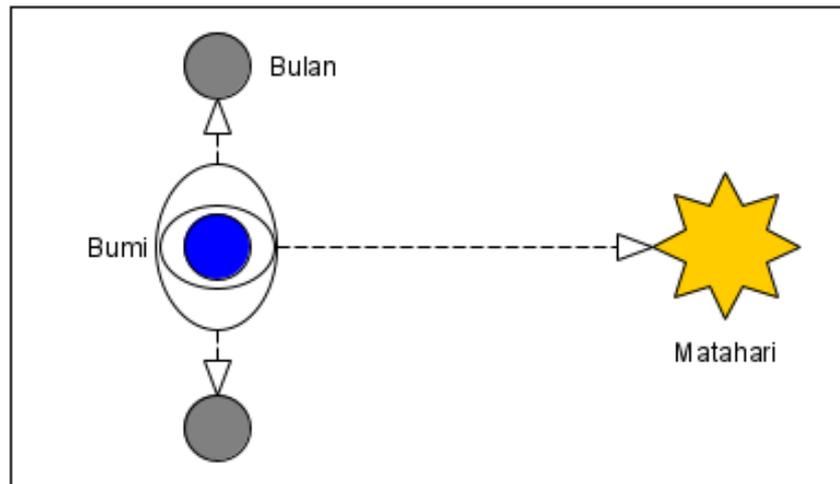
Pasang surut atmosfer adalah gerakan atmosfer bumi yang diakibatkan oleh adanya aksi gravitasi dari matahari dan bulan atau benda langit lainnya. Gerakan atmosfer ini bisa dideteksi dengan barometer, yang mencatat perubahan tekanan udara di muka laut.

2. Pasang surut laut

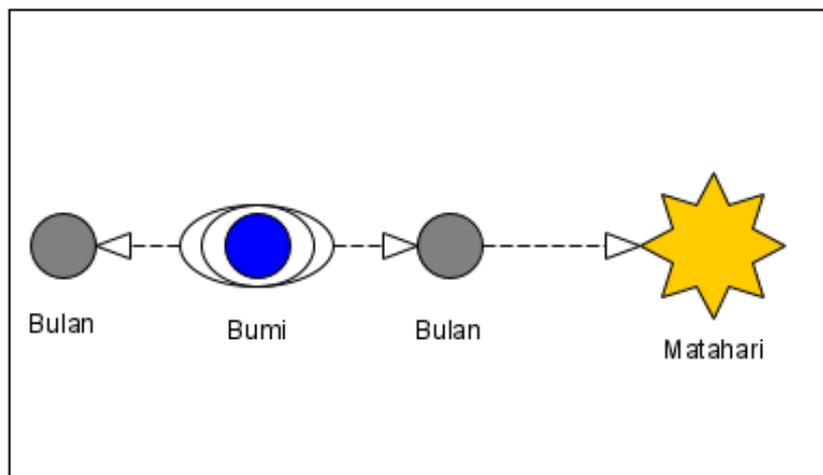
Pasang surut laut adalah gerakan vertikal dari air laut yang terjadi secara periodik yang disebabkan oleh atraksi benda-benda langit (terutama bulan dan matahari) terhadap bumi, serta gaya-gaya lainnya, seperti gaya berat dan gaya sentripetal.

### 3. Pasang surut bumi padat

Pasang surut bumi padat adalah gangguan akibat gaya gravitasi benda langit terhadap bagian bumi padat. Gangguan ini sangat kecil, sehingga hampir tidak bisa dilihat secara jelas. Tapi untuk pengukuran dari ketinggian suatu tempat dan penelitian geofisika lainnya, gangguan ini harus diperhatikan besar geraknya. Tetapi karena uraian yang akan kita bahas tentang pasang surut laut maka untuk selanjutnya pasang surut diartikan sebagai pasang surut laut.



Gambar 2. 1 Pasang perbani



Gambar 2. 2 Pasang purnama

Pasang surut laut dipermukaan bumi dengan ketinggian air maksimum terjadi pada saat titik-titik pusat bumi, bulan, dan matahari berada dalam satu garis lurus, pasang surut ini dinamakan pasang purnama atau *spring tides*. Sedangkan pasang surut laut dengan ketinggian air minimum terjadi pada saat garis hubung titik-titik pusat bumi dan matahari tegak lurus dengan garis hubung titik-titik pusat bumi dan bulan, pasang surut ini dinamakan pasang surut perbani atau *neap tides* [10].

Faktor-faktor non astronomis yang memengaruhi tinggi pasang surut adalah kedalaman perairan dan keadaan metereologi serta faktor hidrografis lainnya. Pasang surut selain fenomena naik dan turunnya air laut yang periodik atau gerakan vertikal juga gerakan horisontal atau arus pasang surut yang periodik pula. Kegunaan studi tentang pasang surut adalah [11].

1. *Scientific Interest*, merupakan tujuan pertama kali dari para ilmuwan dalam mempelajari gejala alam
2. *Navigation*, untuk memperkirakan atau meramalkan tinggi muka air dan kekuatan serta arah arusnya.
3. *Hydraulic Engineering*, mempelajari kondisi pasang surut bagi keperluan bangunan dan operasi-operasi dipantai atau di lepas pantai.

### **2.1.2. Gaya Pembangkit Pasang Surut**

Dalam fenomena pasang surut, ada beberapa hal yang memberikan pengaruh dalam pembentukan pasang surut. Gerakan dari bulan dan matahari mempengaruhi proses pembentukan pasang surut air laut mempunyai peranan penting [12]. Adapun gerakan-gerakan tersebut diantaranya adalah:

- a Revolusi bumi terhadap matahari, di mana orbitnya berbentuk elips dan periode yang diperlukan untuk menyelesaikan revolusinya adalah 365,25 hari.
- b Perputaran bumi terhadap sumbunya sendiri dan waktu yang diperlukannya dalam berputar adalah 24 jam.
- c Revolusi bulan terhadap bumi, di mana orbitnya berbentuk elips dan memerlukan waktu 29,5 hari untuk menyelesaikan revolusinya.

Adanya interaksi antara bulan dan matahari terhadap bumi mempunyai peran yang signifikan terhadap terjadinya proses pasang surut, sesuai dengan pernyataan dari Newton yaitu suatu massa bola yang sangat kecil ( $M_1$ ) berjarak  $r$  (dari pusat ke pusat) dari massa bola kecil lainnya ( $M_2$ ) terjadi tarik-menarik dengan gaya sebesar:

$$F = K \frac{M_1 \times M_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Rumus diatas merupakan interaksi antara bulan dan matahari dengan  $F$  merupakan gaya tarik menarik antara dua buah benda dengan satuan Newton (N),  $M_1$  merupakan massa benda 1 (Kg),  $M_2$  merupakan massa benda 2 (Kg),  $r$  = jarak antara pusat benda 1 dan 2 (m),  $k$  = konstanta gravitasi ( $6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ ).

Dengan adanya perputaran (rotasi bumi) maka pada setiap titik di bumi bekerja gaya sentrifugal ( $F_c$ ) yang sama besar dan arahnya. Arah gaya tersebut berlawanan dengan posisi bulan. Selain itu karena pengaruh gravitasi bulan, setiap titik di bumi mengalami gaya tarik ( $F_g$ ) dengan arah menuju pusat massa bulan, sedang besar gaya tergantung pada jarak antara titik yang ditinjau dan pusat masa bulan..

### 2.1.3. Metode Pengamatan Pasang Surut

Dalam pengamatan pasang surut terdapat dua cara, yakni pengamatan langsung dan pengamatan tidak langsung [12].

#### a Metode Pengamatan Langsung

Pengamatan dilaksanakan dengan membaca skala pada rambu pasang surut yang terkena atau berimpit dengan permukaan air laut pada setiap jangka waktu tertentu. Untuk pengamatan jangka pendek, cara ini banyak dipakai, sebab sangat murah pembiayaannya.

#### b Metode Pengamatan Tidak Langsung

Pengamatan dilaksanakan dengan memasang alat *Automatic Tide Gauge* pada tempat-tempat yang dipilih dan dikenal dengan nama stasiun pasang surut. Cara ini untuk pengamatan jangka panjang. Hasil pengamatan yang diperoleh tidak merupakan besaran-besaran yang langsung menunjukkan kedudukan permukaan

air laut. Dilakukan perubahan dari grafik yang diperoleh ke dalam suatu harga yang didasarkan dari pembacaan rambu pasang surut yang dipasang sebagai skala pembanding (standar).

#### 2.1.4. Tipe Pasang Surut

Fenomena pasang surut pada setiap daerah mempunyai tipe yang berbeda. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan letak geografisnya. Selain itu, pasang surut juga dipengaruhi oleh frekuensi air pasang dengan surut setiap harinya dimana adanya perbedaan respon setiap lokasi terhadap gaya pembangkit pasang surut. Pada umumnya sifat pasut di suatu perairan ditentukan dengan menentukan perbandingan antara amplitudo (tinggi gelombang) unsur-unsur pasang surut tunggal utama dengan unsur-unsur pasang surut ganda utama menggunakan bilangan *formzahl* yang dinyatakan dengan rumus sebagai berikut [12].

$$F = \frac{(O_1 + K_1)}{(M_2 + S_2)} \quad (2.2)$$

dimana,

F : bilangan *formzahl*

O<sub>1</sub> : amplitudo komponen pasang surut tunggal utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan.

K<sub>1</sub> : amplitudo komponen pasang surut tunggal utama yang disebabkan oleh gayatarik matahari.

S<sub>2</sub> : amplitudo komponen pasang surut ganda utama yang disebabkan oleh gaya tarik matahari.

M<sub>2</sub> : amplitudo komponen pasang surut ganda utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan

Berdasarkan harga  $F$  ini, dapat diklasifikasikan tipe pasang surut yang terjadi di suatu perairan.

1.  $0 < F \leq 0,25$  : Pasang Ganda Murni

Dua kali pasang dalam satu hari dengan tinggi yang sama (secara pendekatan). Interval waktu antara transit bulan dan pasang naik pada suatu tempat, hampir sama. *Range* rata-rata pada pasang purnama adalah  $2(M_2 + S_2)$ .

2.  $0,25 < F \leq 1,5$  : Pasang Campuran Ganda.

Terdapat dua kali pasang dalam satu hari tetapi tinggi dan interval waktu transit bulan dan pasang naik tidak sama. Perbedaan ini mencapai maksimum bila deklinasi bulan telah mencapai maksimumnya. *Range* rata-rata pada pasang purnama adalah  $2(M_2 + S_2)$ .

3.  $1,5 < F \leq 3$  : Pasang Campuran Tunggal.

Kadang-kadang hanya satu kali pasang dalam waktu satu hari yang mengikuti deklinasi maksimum dari bulan. Dan kadang-kadang terjadi dua kali dalam satu hari tetapi tinggi dan interval waktu antara transit bulan dan pasang naik sangat berbeda sekali, apabila bulan telah melewati ekuator. *Range* rata-rata pada pasang purnama adalah  $2(O_1 + K_1)$ .

4.  $F > 3$  : Pasang Tunggal Murni.

Satu kali pasang dalam satu hari. Pada saat pasang perbani ketika bulan telah melewati bidang ekuator dapat juga terjadi dua kali pasang dalam satu hari. *Range* rata-rata pada pasang purnama adalah  $2(O_1 + K_1)$ .

Pada umumnya pasang surut memiliki empat tipe [13], yaitu

1. Pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*). merupakan pasut yang hanya terjadi satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari, ini terdapat di Selat Karimata.
2. Pasang surut harian ganda (*semi diurnal tide*). merupakan pasut yang terjadi dua kali pasang dan dua kali surut yang tingginya hampir sama dalam satu hari, ini terdapat di Selat Malaka hingga Laut Andaman.
3. Pasang surut campuran condong harian tunggal (*mixed tide, prevailing diurnal*). merupakan pasut yang tiap harinya terjadi satu kali pasang dan satu kali surut tetapi terkadang dengan dua kali pasang dan dua kali surut yang

sangat berbeda dalam tinggi dan waktu, ini terdapat di Pantai Selatan Kalimantan dan Pantai Utara Jawa Barat.

4. Pasang surut campuran condong harian ganda (*mixed tide, prevailing semi diurnal*). merupakan pasut yang terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari tetapi terkadang terjadi satu kali pasang dan satu kali surut dengan memiliki tinggi dan waktu yang berbeda.

#### **2.1.5. Konstanta Harmonik**

Komponen-komponen gaya pembangkit pasut dikembangkan oleh Doodson menggunakan teori potensial dan kaidah segitiga bola pada bidang permukaan bumi dan pengaruh matahari serta benda-benda langit lainnya sehingga diperoleh komponen-komponen harmonik yang membentuk pola pasut [9]. Komponen harmonik tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa bagian berdasarkan karakteristik tertentu, yaitu semidiurnal, diurnal, dan periode panjang.

Pasang surut yang dihasilkan oleh matahari bumi tidak sebesar pasang surut bulan-bumi hal ini disebabkan karena jarak matahari terhadap bumi lebih jauh daripada jarak bulan terhadap bumi, walaupun massa matahari lebih besar daripada bulan. Maka gaya pembangkit pasang surut dari matahari hanya separuh (50%) dari gaya pembangkit pasang surut dari bulan.

Oleh karena posisi bulan dan matahari terhadap bumi berubah-ubah maka resultan gaya pasang surut yang dihasilkan dari gaya tarik kedua benda angkasa tersebut tidak sesederhana yang diperkirakan. Konstanta harmonik pasang surut untuk tiap-tiap pengamatan berbeda-beda, akan tetapi secara garis besar konstanta ini dapat dibagi dalam empat kelompok utama [9] yaitu :

- a Konstanta harmonik periode panjang (*long period tide*).
- b Konstanta harmonik periode setengah harian (*semidiurnal period tide*).
- c Konstanta harmonik periode harian (*diurnal period tide*).
- d Konstanta harmonik perairan dangkal (*shallow water tide*).

### 2.1.5.1. Konstanta Periode Panjang (*Long period tide*)

Penentuan konstanta bulan dan matahari yang telah dijelaskan diatas diasumsikan bahwa perubahan deklinasi matahari dan bulan, perubahan jarak bumi-bulan dan perubahan jarak bumi-matahari sifatnya teratur. Akan tetapi, kenyataannya tidak demikian, Konstanta periode matahari dan bulan muncul karena adanya ketidakteraturan dari perubahan-perubahan tersebut sehingga perlu ditambahkan konstanta periode Panjang pada konstanta bulan  $M_2$  dan konstanta matahari  $S_2$ .

Tabel 2. 1 Konstanta periode panjang bulan

| No | Simbol | Nama Konstanta          | Periode Pasut (hari) | Kecepatan ( $^{\circ}$ /jam) | Amplitudo       |
|----|--------|-------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | $M_f$  | <i>Long fortnightly</i> | 13,660               | 1,098                        | 0.16 dari $M_2$ |
| 2  | $M_m$  | <i>Lunar monthly</i>    | 27,554               | 0,544                        | 0.86 dari $M_2$ |

Sedangkan konstanta periode panjang matahari masing-masing adalah  $S_{\alpha}$  dengan periode sekitar enam bulan dan konstanta  $S_{\alpha}$  dengan periode sekitar satu tahun. Secara praktis konstanta periode panjang tidak dapat dipisahkan dari pengaruh meteorologi karena periodenya panjang dan amplitudonya kecil.

### 2.1.5.2. Konstanta Setengah Harian (*Semidiurnal period tide*)

Pasang konstanta setengah harian adalah  $M_2$  untuk bulan dan  $S_2$  untuk matahari seperti yang terlihat pada tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2. 2 Konstanta utama setengah harian

| No | Simbol | Nama Konstanta                 | Periode Pasut (jam) | Kecepatan ( $^{\circ}$ /jam) | Amplitudo       |
|----|--------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | $M_2$  | <i>Principal lunar</i>         | 12,42               | 28,984                       | Asumsi = 1      |
| 2  | $S_2$  | <i>Principal solar</i>         | 12,00               | 30,00                        | 0.42 dari $M_2$ |
| 3  | $N_2$  | <i>Larger lunar elliptic</i>   | 12,66               | 28,440                       |                 |
| 4  | $K_2$  | <i>Luni solar semi diurnal</i> | 11,98               | 30,082                       |                 |

Pasangan konstanta  $M_2$  dan  $S_2$ , menimbulkan pasang surut purnama pada fase dengan amplitude maksimum dan pasang surut perbani pada fase dengan amplitude minimum.

### 2.1.5.3. Konstanta Harian (*Diurnal period tide*)

Konstanta pasang surut laut harian terdiri dari pasangan harian bulan dan pasangan harian matahari. Pasangan konstanta harian bulan diberi nama  $K_1$  dan  $O_1$  sedangkan pasangan konstanta harian matahari diberi nama  $Q_1$  dan  $P_1$ . Kedua jenis konstanta tersebut dapat dilihat pada tabel 2.3 dibawah ini

Tabel 2. 3 Konstanta utama harian

| No | Simbol | Nama Konstanta                 | Periode Pasut (jam) | Kecepatan ( $^{\circ}$ /jam) | Amplitudo       | Efek               |
|----|--------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|
| 1  | $K_1$  | <i>Luni solar diurnal</i>      | 23,93               | 15,041                       | 0.40 dari $M_2$ | Bulan dan Matahari |
| 2  | $O_1$  | <i>Principal lunar diurnal</i> | 25,82               | 13,943                       | 0.41 dari $M_2$ | Bulan              |
| 3  | $Q_1$  | <i>Larger lunar ecliptic</i>   | 26,86               | 15,041                       | 0.18 dari $M_2$ | Bulan              |
| 4  | $P_1$  | <i>Principal solar diurnal</i> | 24,07               | 14,959                       | 0.9 dari $M_2$  | Matahari           |

Amplitudo maksimum dari konstanta harian bulan dicapai saat bulan pada deklinasi maksimum baik di utara maupun di selatan ekuator, sedangkan saat bulan berada di ekuator langit, pasang surut hariannya mempunyai amplitude minimum. Sedangkan pada konstanta harian matahari, amplitude paling besar dicapai saat matahari berada di deklinasi maksimum baik di utara maupun di selatan ekuator dan paling kecil saat matahari di ekuator.

Dari komponen harmonik yang didapat, tipe pasang surut di suatu perairan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan yang biasa disebut dengan bilangan *formzhal*. dan klasifikasi dari tipe pasang surut berdasarkan bilangan *formzhal* dapat dilihat pada tabel 2.4

Tabel 2. 4 Tipe pasang surut berdasarkan bilangan formzhal (Pugh, 1987)

| Bilangan <i>Formzhal</i> | Tipe Pasang Surut                |
|--------------------------|----------------------------------|
| 0-0,25                   | <i>semidiurnal</i>               |
| 0,25-1,50                | <i>mixed, mainly semidiurnal</i> |
| 1,50-3,00                | <i>mixed, mainly diurnal</i>     |
| >3,00                    | <i>diurnal</i>                   |

### 2.1.6. Elevasi Muka Air Laut

Elevasi muka air laut selalu mengalami perubahan mengikuti fenomena pasang surut yang terjadi di suatu tempat. Elevasi muka air laut ini beberapa dijadikan sebagai pedoman tinggi muka air dan referensi tinggi suatu tempat. Beberapa elevasi muka air laut yang digunakan antara lain: [14]

- a *Chart datum*, adalah bidang referensi vertikal yang dipilih berada di bawah *low water spring*. Bidang referensi ini khusus digunakan untuk pembuatan peta navigasi laut, dengan alasan keselamatan pelayaran.
- b *High water level* (HWL) atau muka air tinggi yakni, kedudukan muka air laut tertinggi pada saat pasang dalam satu siklus pasang surut.
- c *Low water level* (LWL) atau muka air rendah yakni, kedudukan muka air terendah pada saat surut dalam satu siklus pasang surut.
- d *Mean sea level* (MSL) atau muka air laut rata-rata yakni, muka air rata-rata dari rata-rata muka air tinggi dan rata-rata muka air rendah. Elevasi MSL ini biasanya digunakan sebagai referensi tinggi di daratan.
- e *Highest astronomical tide* (HAT), adalah permukaan laut tertinggi yang dapat diramalkan terjadi di bawah pengaruh keadaan meteorologist rata-rata dan kombinasi keadaan astronomi.
- f *Lowest astronomical tide* (LAT), adalah permukaan air laut terendah yang dapat diramalkan terjadi di bawah pengaruh keadaan meteorologist rata-rata dan kombinasi keadaan astronomi.

## 2.2. Satelit Altimetri

### 2.2.1. Pengertian Satelit Altimetri

Sistem satelit altimetri berkembang sejak tahun 1975 saat diluncurkannya sistem satelit Geos-3. Pada saat ini secara umum sistem satelit altimetri mempunyai tiga objektif ilmiah jangka panjang, yaitu: mengamati sirkulasi lautan global, memantau volume dari lempengan es kutub dan mengamati perubahan muka laut rata-rata (MSL) global

Dalam konteks geodesi, objektif terakhir dari misi satelit altimetri tersebut adalah yang paling menjadi perhatian. Dengan kemampuannya untuk mengamati topografi dan dinamika dari perubahan laut secara kontinyu, maka satelit altimetri tidak hanya bermanfaat untuk pemantauan perubahan MSL global, tetapi juga akan bermanfaat untuk beberapa aplikasi geodetik dan oseanografi lainnya seperti [14]

- Penentuan topografi permukaan laut (*Sea Surface Topography/ SST*)
- Penentuan topografi muka es
- Penentuan geoid di wilayah lautan
- Penentuan karakteristik arus dan *eddies*
- Penentuan tinggi (signifikan) dan panjang (dominan) gelombang
- Studi pasang surut di lepas pantai
- Penentuan kecepatan angin di atas permukaan laut
- Penentuan batas wilayah laut dan es
- Studi fenomena El Nino
- Unifikasi datum tinggi antar pulau

### 2.2.2. Prinsip Dasar Satelit Altimetri

Prinsip dasar satelit altimetri sangat sederhana. Satelit ini digunakan sebagai *platform* yang bergerak untuk sensor yang mentransmisikan pulsa gelombang mikro dalam domain frekuensi radar ke permukaan bumi, dan menerima sinyal yang kembali setelah terjadi pemantulan pada permukaan bumi [14]. Ketinggian satelit di atas permukaan laut ( $\alpha$ ) dapat diturunkan sebagai aproksimasi pertama dari waktu tempuh ( $\Delta t$ ) dari pulsa radar yang dikirimkan ke permukaan laut dan dipantulkan kembali ke satelit dengan persamaan 2.3:

$$\alpha = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.3)$$

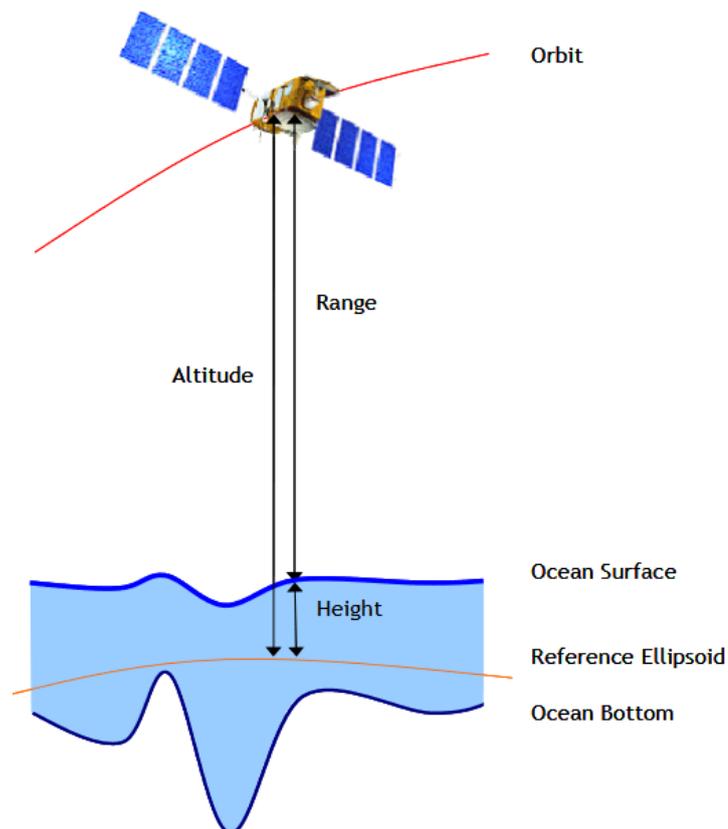
dimana:

$\alpha$  : ketinggian satelit (m)

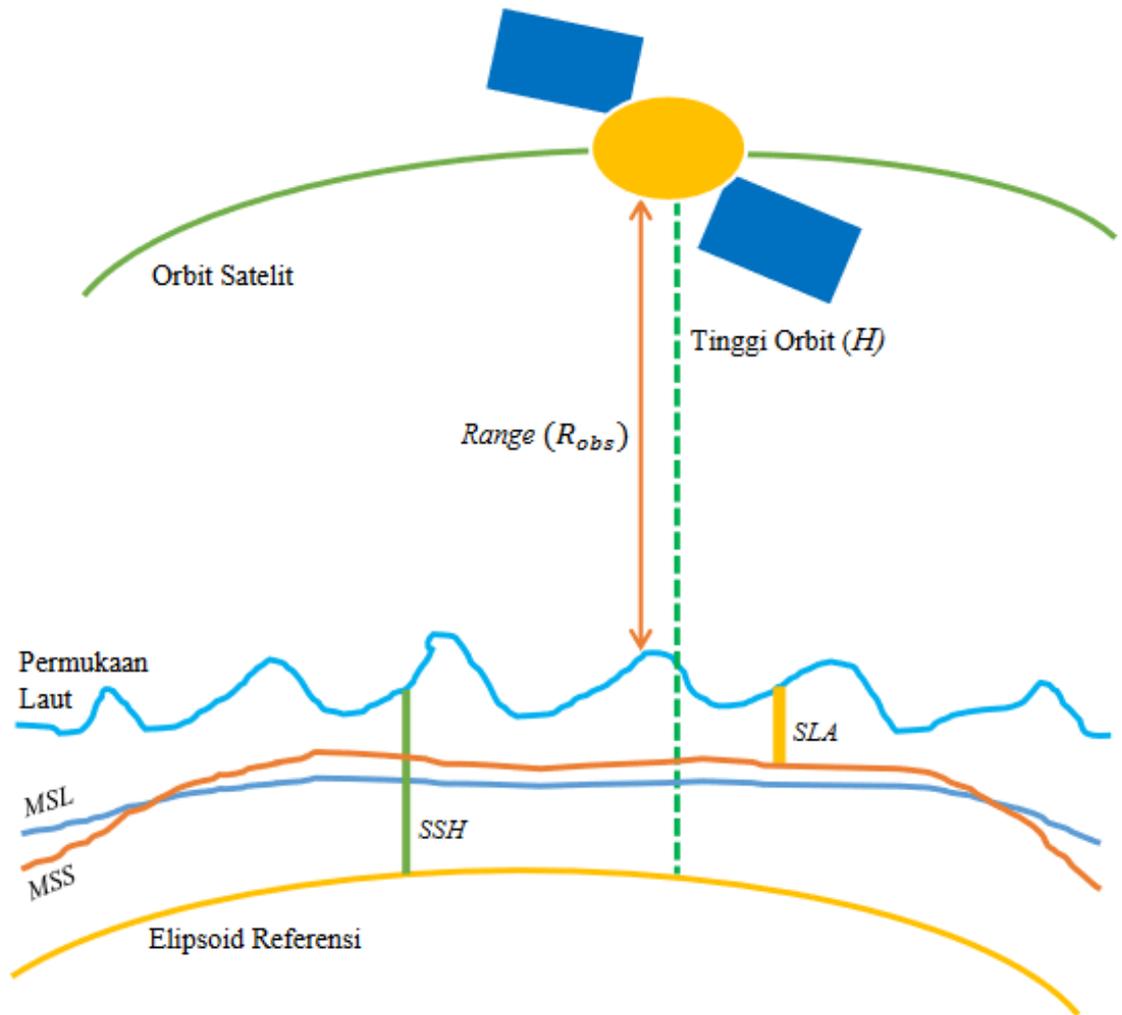
$c$  : cepat rambat sinyal (m/s)

$\Delta t$  : waktu tempuh (s)

Satelit altimetri diperlengkapi dengan pemancar pulsa radar (*transmitter*), penerima pulsa radar yang sensitif (*receiver*), serta jam berakurasi tinggi. Pada sistem ini, radar altimeter yang dibawa oleh satelit memancarkan pulsa-pulsa gelombang elektromagnetik (radar) ke permukaan laut. Pulsa-pulsa tersebut dipantulkan balik oleh permukaan laut dan diterima kembali oleh satelit [15].



Gambar 2. 3 Prinsip satelit altimetri (AVISO, 2015)



Gambar 2.4 Sistem pengukuran satelit altimetri (Hasan, 2019)

Perlu dicatat bahwa untuk mengeliminasi efek dari gelombang serta gerakan muka laut berfrekuensi tinggi lainnya, jarak ukuran adalah jarak rata-rata dalam *footprint*. Dari data rekaman waktu tempuh sinyal, serta amplitudo, dan bentuk muka sinyal setelah dipantulkan oleh permukaan laut, beberapa karakteristik muka laut dapat diestimasi seperti yang diberikan pada tabel 2.5:

Tabel 2. 5 Prinsip satelit altimetri (Seeber, 1993)

| <b>Dari data waktu tempuh sinyal</b>   | <b>Dari data bentuk dan struktur muka gelombang pantul</b>                                    |
|--|---|
| Posisi vertikal<br>Topografi muka laut<br>Undulasi geoid<br>Topografi es<br>Lokasi dan kecepatan arus laut | Tinggi gelombang<br>Panjang gelombang dominan<br>Informasi termoklin<br>Kemiringan lapisan es |
| <b>Dari data amplitudo gelombang pantul</b>  |   |
| Kecepatan angin permukaan sepanjang ground track satelit<br>Batas laut/es                                  |   |

### 2.2.3. Geometri Pengamatan Satelit Altimetri

Geometri pengamatan satelit altimetri direpresentasikan secara matematis sebagai berikut:

$$h = N + H + \Delta H + a + d \quad (2.4)$$

dimana:

$h$  : tinggi ellipsoid dari satelit altimeter (dihitung dari informasi orbit)

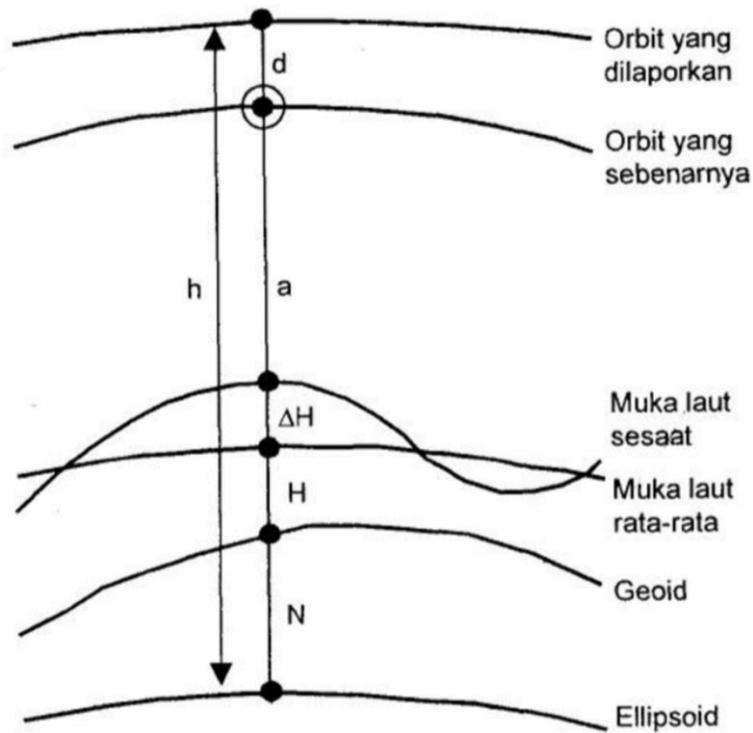
$N$  : undulasi geoid

$H$  : *sea surface topography* (SST)

$\Delta H$  : efek pasut instantaneous

$a$  : hasil ukuran altimeter

$d$  : kesalahan orbit



Gambar 2. 4 Geometri pengamatan satelit altimetri (Seeber, 1993)

Hasil ukuran altimeter ( $a$ ) pada persamaan di atas merupakan hasil ukuran yang sudah dikoreksi dengan kesalahan-kesalahan akibat refraksi ionosfer dan troposfer, serta kesalahan dan bias yang terkait dengan sensor altimeter serta dinamika muka laut.

#### 2.2.4. Satelit Altimetri Jason-2

Satelit Jason-2/ OSTM (*Ocean Surface Topography Mission*) merupakan satelit misi lanjutan dari satelit TOPEX/ *Poseidon* dan Jason-1. Apabila satelit TOPEX/ *Poseidon* dan Jason-1 adalah misi satelit di bawah kerja sama dari *French Space Agency* “*Centre National d’Etudes Spatiales*” (CNES) dan *United States National Aeronautics and Space Administration* (NASA), Jason-2/ OSTM melibatkan CNES, NASA, dan dua partner baru yaitu *The European Organisation for The Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) dan *The National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dalam upaya untuk memfasilitasi peralihan pada misi operasional altimetri secara penuh, dapat memenuhi aktualitas dan realibilitas data yang dibutuhkan untuk operasional aplikasi.



Gambar 2. 5 Satelit Jason-2/OSTM (AVISO, 2015)

Tabel 2. 6 Karakteristik satelit Jason-2 (AVISO, 2015)

|   |                 |
|---|-----------------|
| <b>Berat satelit</b>                    | 525 kg          |
| <b>Kekuatan satelit</b>                 | 511 W           |
| <b>Kendaraan peluncur</b>               | Delta II (7320) |
| <b>Eksentrisitas</b>                    | 0,000095        |
| <b>Inklinasi</b>                        | 66,04 derajat   |
| <b>Tinggi referensi (dari elipsoid)</b> | 1,336 km        |
| <b>Jarak antar lintasan</b>             | 315 km          |
| <b>Kecepatan orbit</b>                  | 72,5 km/s       |
| <b>Kecepatan saat <i>tracking</i></b>   | 5,8 km/s        |
| <b>Periode pengulangan</b>              | 9,9156 hari     |

Misi Satelit Jason-2/ OSTM merupakan misi lanjutan dari dua satelit pendahulunya yaitu T/P dan Jason-1 dengan dua misi utama yaitu:

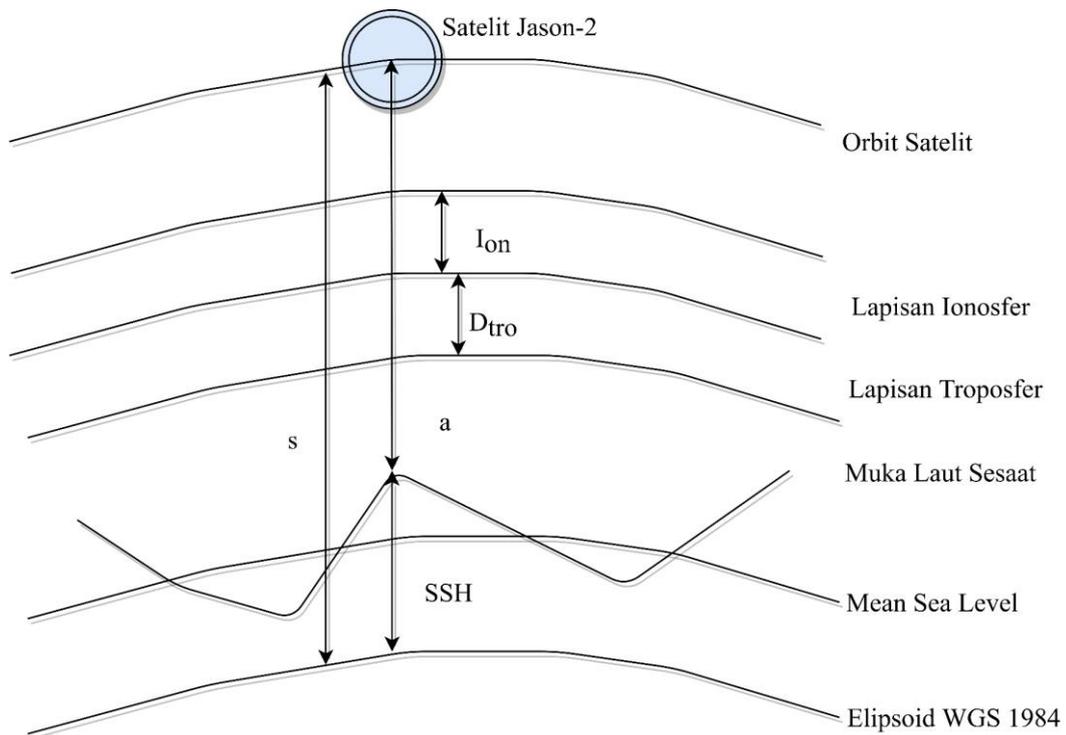
- Memastikan kelanjutan dari pengukuran dengan kualitas tinggi untuk ilmu kelautan.
- Menyediakan produk operasional untuk aplikasi perpaduan dan peramalan.

### 2.3. Sea Surface Height (SSH)

Sea Surface Height (SSH) adalah tinggi permukaan laut di atas ellipsoid referensi [16]. Nilai SSH dihitung dengan cara mengurangkan tinggi satelit dengan pengukuran altimeter yang telah dikoreksi melalui persamaan 2.5:

$$\text{Sea Surface Height} = \text{Altitude} - \text{Corrected Range} \quad (2.5)$$

Hubungan antara Sea Surface Height (SSH) dan komponen pembentukannya diilustrasikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 6 Hubungan antara SSH dan komponen-komponen pembentuknya (Gunadi, 1999)

Dari ilustrasi tersebut, secara umum pencarian nilai SSH dapat dirumuskan seperti pada persamaan 2.6 [17]

$$SSH = s - (a + W_{trop} + D_{trop} + I_{ono} + EMB) \quad (2.6)$$

dimana:

$SSH$  :tinggi permukaan laut di atas ellipsoid referensi WGS 84 (mm)

$s$  :tinggi satelit di atas ellipsoid referensi WGS 84 (mm)

$a$  :jarak dari antenna altimeter satelit ke permukaan laut sesaat (mm)

$W_{trop}$  : koreksi troposfer basah (mm)

$D_{\text{trop}}$  : koreksi tropofer kering (mm)

$I_{\text{ono}}$  : koreksi ionosfer (mm)

$EMB$  : *Electromagnetic Bias*/ bias elektromagnetik (mm) yaitu perbedaan antara muka laut rata-rata dengan muka pantulan rata-rata yang disebabkan oleh tingkat kekasaran permukaan laut yang tidak homogen secara spasial

#### 2.4. Mean Sea Surface (MSS)

*Mean Sea Surface* merepresentasikan posisi permukaan air laut rata-rata pada suatu periode waktu tertentu untuk menghilangkan sinyal *sea surface height* (SSH) tahunan, setengah tahun, musiman, dan sinyal palsu. *Mean Sea Surface* diberikan sebagai sebuah *grid* dengan dengan jarak *grid* yang konsisten dari data altimetri dan data lain yang digunakan untuk mendapatkan turunan nilai *grid* [16]. *Grid Mean Sea Surface* dapat bermanfaat untuk mengedit data, menghitung jalur *track* dan gradien silang *track* geoid, menentukan permukaan dari topografi muka laut, menghitung nilai *grid* dari anomali gaya berat, untuk studi geofisika, untuk referensi permukaan yang mana data *sea surface height* dapat direduksi dari berbagai misi satelit altimetri yang berbeda.

#### 2.5. Sea Level Anomaly (SLA)

*Sea Level Anomaly* (SLA) adalah tinggi permukaan laut dikurangi dengan permukaan laut rata-rata dan efek geofisik yang diketahui, yaitu pasang surut dan *inverse barometer* (pengaruh tekanan atmosfer) [16]. Dalam SLA efek geofisik tersebut sudah dihilangkan. Efek pasang surut mencakup *Solid Earth Tide* (SET), *Earth Ocean Tide* (EOT), dan *Pole Tide* (PT) [18]. Nilai SLA didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.6:

$$SLA = SSH - \text{Bidang Geoid} - \text{Koreksi Nois} \quad (2.6)$$

Koreksi nois terdiri:

$$\text{Koreksi Nois} = \varepsilon^{Ion} + \varepsilon^{trop(wet)} + \varepsilon^{tro(dry)} + \varepsilon_{SSB} + \varepsilon^{ot} + \varepsilon^{et} + \varepsilon^{pt} + \varepsilon^{LB} + \varepsilon^L + \varepsilon_{GH/MSS} \quad (2.7)$$

dimana :

- $\varepsilon^{ion}$  : koreksi ionosfer (mm)
- $\varepsilon^{tro(wet)}$  : koreksi troposfer basah (mm)
- $\varepsilon^{tro(dry)}$  : koreksi troposfer kering (mm)
- $\varepsilon_{SSB}$  : koreksi gelombang permukaan (mm)
- $\varepsilon^{ot}$  : koreksi efek pasang surut laut (mm)
- $\varepsilon^{et}$  : koreksi efek pasang surut bumi (mm)
- $\varepsilon^{pt}$  : koreksi efek pasang surut kutub (mm)
- $\varepsilon^{IB}$  : koreksi efek *inverse barometer* (mm)
- $\varepsilon^L$  : koreksi efek *ocean loading* (mm)
- $\varepsilon_{GH/MSS}$  : reduksi tinggi geoid atau *mean sea surface* (mm)

SLA mengandung informasi [16] sebagai berikut :

- Perubahan yang secara nyata terjadi pada topografi laut yang terkait dengan arus laut.
- Respon dinamis terhadap tekanan atmosferik.
- Perbedaan antara pasang surut dan model pasang surut.
- Perbedaan antara model *Mean Sea Surface* dan *Mean Sea Surface* yang sebenarnya terjadi pada lokasi orbit *Jason-2/ OSTM*.
- Efek pengukuran *unmodeled* atau *mismodel* (seperti kemiringan, bias elektromagnetik, kesalahan altimeter, koreksi troposfer, koreksi ionosfer, dan lain-lain).
- Kesalahan orbit.

## 2.6. Total Water Level Envelope (TWLE)

*Total Water Level Envelope* (TWLE) adalah ketinggian muka laut yang masih dipengaruhi efek dinamika laut, efek pasang surut dan efek atmosfer. Dalam praktiknya, TWLE dihitung berdasarkan *sea surface height anomaly*, berbeda dari *sea surface height* yang sudah dikoreksi *ionospheric delay*, *wet/dry tropospheric delays*, *sea state bias*, *loading tides* dan *solid earth tides*. Oleh karena itu TWLE adalah ukuran ketinggian air aktual yang dialami oleh pengamat di pantai.

$$\begin{aligned} TWLE = SSH - MSS - Solid\ Earth\ Tide - Pole\ Tide - Inv.\ Barometer \\ - Hf.\ Fluctuations \end{aligned} \quad (2.8)$$

## 2.7. Tidal Aliasing

Pengaruh yang menyebabkan sinyal-sinyal yang berbeda menjadi tidak dapat dibedakan satu sama lain (atau menjadi alias sinyal yang lain) saat rekonstruksi sampel disebut sebagai fenomena *aliasing*. Aliasing menggunakan data diskrit dan bukan data kontinyu. Data pasut merupakan data diskrit, maka data pasut tidak dapat dipisahkan dari masalah aliasing. Metode yang digunakan untuk mencegah aliasing dinamakan *dealiasing*. Metode *dealiasing* yang diterapkan pada analisis pasut dengan pembatasan domain frekuensi. Modifikasi data pasut hanya dilakukan dengan pencuplikan data, bukan pada penambahan panjang data.

*Tidal Aliasing* adalah suatu fenomena yang timbul jika pemilihan waktu (interval) pencuplikan data pasut yang terlalu besar, sehingga menyebabkan frekuensi dari konstanta pasut akan lebih tinggi dari batasan frekuensi yang ditetapkan. Pada umumnya interval waktu pencuplikan ( $\Delta t$ ) data pasut  $\frac{1}{4}$  sampai 1 jam. Pengamatan dengan  $\Delta t > 1$  jam akan semakin tidak menggambarkan karakter fenomena pasut sebenarnya. Pengamatan dengan  $\Delta t$  Jason 2 tiap 9.9165 hari atau 237,975 jam (periode pengamatan) tentu akan menimbulkan aliasing. Pada pengulangan tersebut satelit ini mengukur tinggi permukaan laut sekali pada posisi yang sama. Oleh karena itu, adanya pengulangan satelit ini menyebabkan pasang surut harian dan semi harian mengalami aliasing dengan periode-periode yang panjang.

Salah satu metode penentuan periode alias yaitu dengan menentukan perubahan fase setelah satu kali pengulangan terlebih dahulu, karena periode alias tergantung dari perubahan fase setelah satu kali pengulangan. Penentuan fasenya sebagai berikut [20]

$$|\Delta\varphi| = 2\pi \left( \frac{T_s}{T_o} - \left[ \frac{T_s}{T_o} + 0.5 \right] \right) \quad (2.14)$$

$$T_A = \frac{360^\circ}{|\Delta\varphi|} \times 9.9165 \text{ hari} \quad (2.15)$$

$\pi$  sebesar  $180^\circ$  dengan  $T_s$  periode pengulangan satelit (9.9165 hari),  $T_o$  periode asli konstanta pasut.  $[T_s/T_o + 0.5]$  diambil nilai integer kurang dari atau sama dengan  $[T_s/T_o + 0.5]$ .

Periode alias dari satelit altimetri Jason 2 untuk beberapa komponen pasut diperlihatkan pada tabel 2.7 [20]

Tabel 2. 7 Periode alias pasut satelit OSTM/Jason 2

| Komponen | T (jam) | TA (hari) |
|----------|---------|-----------|
| M2       | 12,42   | 62,11     |
| S2       | 12      | 58,74     |
| N2       | 12,66   | 49,53     |
| K1       | 23,93   | 173,19    |
| O1       | 25,82   | 45,71     |
| P1       | 24,07   | 88,89     |

## 2.8. Analisis Harmonik Pasang Surut Metode *Least Square*

Salah satu metode perhitungan nilai pasang surut adalah dengan menggunakan metode *least square*. Perhitungan pasang surut metode *least square* merupakan metode perhitungan pasang surut dimana metode ini berusaha membuat garis yang mempunyai jumlah selisih (jarak vertikal) antara data dengan regresi yang terkecil. Pada prinsipnya metode *least square* meminimumkan persamaan elevasi pasang surut, sehingga diperoleh persamaan simultan. Kemudian persamaan simultan tersebut diselesaikan dengan metode numerik sehingga diperoleh konstanta pasang surut [11].

Persamaan numerik pasang surut secara umum adalah sebagai berikut:

$$ht_i = Z_0 + \sum_1^n H_n \cos[\omega_n t_i + g_n] \quad (2.9)$$

$$ht_i = Z_0 + \sum_1^n H_n [\cos(\omega_n t_i) \cos(g_n) - \sin(\omega_n t_i) \sin(g_n)] \quad (2.10)$$

$$ht_i = Z_0 + \sum_1^n A_n \cos(\omega_n t_i) - \sum_1^n B_n \sin(\omega_n t_i) \quad (2.11)$$

$$H_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.12)$$

$$g_n = \arctg\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (2.13)$$

dimana:

$ht_i$  : elevasi muka air jam ke  $i$  (satuan meter)

$H_n$  : amplitudo komponen ke  $n$  (satuan meter)

$\omega_n$  : kecepatan sudut ( $2\pi/T_n$ ) (satuan derajat/ jam)

$A_n$  :  $H_n \cos(g_n)$

$B_n$  :  $H_n \sin(g_n)$

Penerapan metode kuadrat terkecil ini sudah disusun dalam program matlab berupa *toolbox* yang sudah banyak digunakan untuk melakukan analisis harmonik pasang surut dengan koreksi nodal, inferensi dan berbagai pilihan yang ditentukan oleh penggunanya. Program ini sudah diperbaharui dengan versi terakhir v 1.4 beta dapat diunduh pada laman [https://eoas.ubc.ca/~rich/#T\\_Tide](https://eoas.ubc.ca/~rich/#T_Tide). [19]

Dalam program *t\_tide* terdiri dari beberapa paket program, yakni

- a. Paket program analisis pasang surut :
  - i. *t\_tide.m* berfungsi untuk melakukan analisis pasut dengan cara menghitung nilai amplitudo dan beda fase konstanta harmonik dari rangkaian waktu yang nyata.
  - ii. *t\_vuf.m* berfungsi untuk melakukan perhitungan koreksi nodal

- iii. *t\_predict.m* berfungsi untuk menghitung prediksi pasut dari konstanta harmonik yang dihasilkan dari *t\_tide.m*.
  - iv. *t\_getconsts.m* berfungsi untuk mengesktrak semua jenis data konstanta harmonik (konstituen) berdasarkan file data dari paket program fortran.
- b Paket program untuk dokumentasi :
- i. *t\_readme.m* merupakan file yang menjelaskan paket proram *t\_tide*
  - ii. *t\_errors.m* merupakan file yang berisi penjelasan mengenai interval kepercayaan dan bagaimana hal tersebut dapat dikembangkan.
- c Paket program untuk demontrasi :
- i. *t\_synth.m* merupakan file yang berfungsi mensintesis data noise untuk mengestimasi ketidakpercayaan terhadap data.
  - ii. *t\_demo.m* berisi tentang contoh demo penggunaan *t\_tide* dengan menggunakan data elevasi yang tersedia.
- d Paket program *for fun*, *t\_equilib* merupakan file yang berfungsi untuk menghitung amplitudo setimbang dari konstanta harmonik utama pada lintang yang diberikan.
- e Paket program lainnya :
- i. *tide3.dat* merupakan file yang berisi data konstituen standar dari paket analisis IOS
  - ii. *t\_equilib.dat* merupakan file yang berisi faktor amplitudo
  - iii. *t\_constituents.mat* merupakan file yang berisi struktur konstituen data.
  - iv. *t\_example.mat* merupakan file contoh yang menggunakan elevasi Stasiun pasut Tuktosuktuk.

## 2.9. Analisis Korelasi

Analisa korelasi adalah metode statistik yang digunakan untuk mengukur besarnya hubungan linier antara dua variabel atau lebih. Nilai korelasi populasi ( $\rho$ ) berkisar pada interval  $-1 \leq \rho \leq 1$ . Jika korelasi bernilai positif, maka hubungan antara dua variabel searah. Sebaliknya, jika korelasi bernilai negatif, maka hubungan antara dua variabel bersifat berlawanan arah. Apabila nilai  $\rho = -1$  artinya korelasi negatif sempurna;  $\rho = 0$  artinya tidak ada korelasi; dan  $\rho = 1$  artinya korelasi sangat kuat.

Rumus korelasi sederhana sebagai berikut [21]

$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (2.16)$$

dimana :

- $r_{xy}$  : koefisien korelasi
- $n$  : jumlah sampel
- $x$  : skor variabel x
- $y$  : skor variabel y
- $\sum x$  : jumlah skor variabel x
- $\sum y$  : jumlah skor variabel y
- $\sum x^2$  : jumlah kuadrat skor variabel x
- $\sum y^2$  : jumlah kuadrat skor variabel y

Tabel 2. 8 Interpretasi koefisien korelasi nilai  $\rho$  [18]

| Interval Koefisien | Tingkat Hubungan |
|--------------------|------------------|
| 0,800-1,000        | Sangat Kuat      |
| 0,600-0,799        | Kuat             |
| 0,400-0,599        | Cukup Kuat       |
| 0,200-0,399        | Lemah            |
| 0,000-0,199        | Sangat Lemah     |