

# PREDIKSI PASANG SURUT PERAIRAN SEKITAR KOTA BITUNG DENGAN PENAMBAHAN KONSTANTA HARMONIK PERAIRAN DANGKAL

*(Tidal Prediction of The Waters Around Bitung City  
with The Addition of Shallow Water Harmonic Constituents)*

**Citra E. Tambunan, Royke M. Rampengan\*, Wilmy E. Pelle,  
Ping A. Angmalisang, Sandra O. Tilaar, Robert A. Bara**

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi,  
Manado, Sulawesi Utara

\*Penulis Korespondensi: [roy\\_rampengan@unsrat.ac.id](mailto:roy_rampengan@unsrat.ac.id)

## ABSTRACT

Bitung is a city with the most intensive marine space utilisation activities in North Sulawesi Province. Therefore, information regarding oceanographic conditions is very important to development in this city. One of the important information regarding oceanographic conditions is tides. This study was conducted to assess the accuracy of tidal prediction with the addition of shallow water harmonic constituents and examine the amplitude fluctuations of the main harmonic component due to the addition of the shallow water constituents. The least squares method was used to calculate the amplitude and phase of tidal harmonic constituents, followed by data prediction. The data used is the measurement data of BMKG Bitung City tidal station in January, February and March 2024. The results obtained are the addition of shallow water harmonic constituents to the tidal analysis around Bitung City increases the accuracy of the prediction data. The best RMSE value for January data is 3.8323 cm; February 4.1902 cm; and March 4.2558 cm. The correlation coefficient increases and the percentage of predicted data with differences  $< 3$  cm and  $< 6$  cm with the observation data becomes larger. It is also found that when processing with few harmonic constituents, the amplitudes of constants M2, S2, K1, and O1 fluctuate. The addition of harmonic constituents in the analysis results in more constant amplitudes of constituents M2, S2, K1, and O1.

**Keywords:** Tidal Prediction, Harmonic constituents, Least square method, Bitung City

## ABSTRAK

Bitung merupakan kota dengan aktivitas pemanfaatan ruang laut paling intensif di Provinsi Sulawesi Utara. Oleh karena itu, informasi menyangkut kondisi oseanografi sangat penting dalam kaitannya dengan gerak pembangunan di kota ini. Salah satu informasi penting menyangkut kondisi oseanografi adalah pasang surut. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengkaji akurasi prediksi pasang surut dengan penambahan konstanta harmonik perairan dangkal serta mengkaji fluktuasi amplitudo komponen harmonik utama akibat penambahan komponen perairan dangkal tersebut. Metode kuadrat terkecil digunakan untuk menghitung amplitudo dan fase konstanta harmonik pasang surut, dilanjutkan dengan melakukan prediksi data. Data yang digunakan adalah data pengukuran stasiun pasang surut BMKG Kota Bitung pada Januari, Februari, dan Maret 2024. Hasil yang diperoleh adalah penambahan konstanta harmonik perairan dangkal pada analisis pasang surut sekitar Kota Bitung meningkatkan akurasi data prediksi. Nilai RMSE terbaik untuk data bulan Januari sebesar 3,8323 cm; Februari 4,1902 cm; dan Maret 4,2558 cm. Koefisien korelasi meningkat dan persentase banyaknya data prediksi dengan beda  $< 3$  cm dan  $< 6$  cm dengan data observasi menjadi lebih besar. Diperoleh juga bahwa pengolahan dengan konstanta harmonik sedikit, amplitudo konstanta M2, S2, K1, dan O1 berfluktuasi. Penambahan konstanta harmonik dalam analisis menghasilkan amplitudo konstanta M2, S2, K1, dan O1 yang nilainya lebih konstan.

**Kata kunci:** Prediksi pasang surut, Konstanta harmonik, Metode kuadrat terkecil, Kota Bitung

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki kawasan laut dengan proporsi lebih besar dibanding daratan. Menurut Suryanti *et al.* (2019), tiga per empat dari keseluruhan wilayah Indonesia adalah lautan dan di dalamnya terdapat lebih dari 17.500 pulau dan tidak hanya itu, Indonesia juga memiliki garis pantai sepanjang 81.000 km. Luasnya perairan laut Indonesia menjadikannya penting untuk pemanfaatan sumber daya dan penyedia jasa lingkungan.

Untuk mengoptimalkan potensi laut, pemahaman tentang kondisi laut sangat diperlukan. Oleh karena itu, pengetahuan tentang oseanografi, yang meliputi fisik, biologi, kimia, dan geologi laut, sangat dibutuhkan dalam pembangunan di Indonesia. Oseanografi adalah nama umum untuk studi ilmiah tentang lautan dan secara historis dibagi menjadi oseanografi fisik, biologi, kimia, dan geologi (Talley *et al.*, 2011).

Pasang surut (pasut) termasuk dalam kajian oseanografi fisik (Thorpe, 2009) dan merupakan salah satu pengetahuan yang sangat dibutuhkan dalam kaitannya dengan pemanfaatan laut. Menurut UNESCO (2016), pasut (dan permukaan laut pada umumnya) selalu menjadi faktor penting dalam operasi pelabuhan, terutama karena meningkatnya kapasitas muatan kapal. Informasi mengenai pasut air laut sangatlah penting terutama di wilayah pesisir, karena berdampak langsung terhadap kehidupan organisme serta aktivitas domestik dan industri di sekitarnya (Yuliardi *et al.*, 2022). Elevasi muka laut merupakan salah satu indikator utama perubahan iklim (Ablain *et al.*, 2017).

Pasut lautan merupakan respon lautan terhadap fluktuasi periodik gaya

pembangkit pasut yang ditimbulkan oleh bulan dan matahari (Forrester, 1983). Berdasarkan definisi ini terkandung pengertian bahwa kondisi pasut di suatu kawasan perairan dapat berbeda dengan kawasan perairan lainnya akibat perbedaan respon lokal. Faktor-faktor non astronomis seperti konfigurasi garis pantai, kedalaman setempat dan topografi dasar perairan, serta pengaruh hidrografik dan meteorologi dapat menjadi faktor penting yang memainkan peran terhadap tunggang air pasut, waktu interval pasang dan surut, serta waktu tibanya air pasang (NOAA, 2003). Demikian juga dinyatakan oleh Pugh & Woodworth (2014) bahwa di perairan dangkal, perkembangan gelombang pasang dipengaruhi oleh gesekan dasar dan proses fisik lainnya.

Salah satu pengetahuan penting menyangkut pasut adalah kajian berhubungan dengan aspek prediksi. Analisis pasut dalam keperluan prediksi menitikberatkan pada akurasi hasil prediksi terhadap kejadian pasang dan surut sebenarnya. Deviasi tipikal tingkat yang diamati dari tingkat pasut yang diprediksi bervariasi dari 0,03 meter di pulau-pulau samudera tropis hingga 0,25 meter atau lebih di lintang tinggi badai (UNESCO, 1985). Akurasi prediksi pasut ditentukan antara lain oleh banyaknya konstanta harmonik yang disertakan dalam pengolahan data.

Umumnya prediksi pasut dilakukan dengan melibatkan sejumlah konstanta harmonik utama saja. Sejumlah konstanta harmonik yang dilibatkan dalam perhitungan diharapkan dapat mengungkapkan variasi pasut di suatu tempat. Oleh karena itu, penambahan sejumlah konstanta yang dilibatkan dalam perhitungan analisis harmonik, rasionalnya bertujuan untuk meningkatkan akurasi

hasil perhitungan. Menurut Pugh & Woodworth (2014), pemilihan banyaknya konstanta yang amplitudo dan fase harmonisnya akan ditentukan dalam suatu analisis terkadang dianggap sebagai suatu seni dalam analisis harmonik pasut.

Secara umum semakin panjang durasi data yang digunakan dalam analisis, semakin banyak jumlah konstituen yang dapat ditentukan secara independen. Walaupun demikian, durasi data yang paling umum digunakan dalam analisis harmonik adalah data observasi sepanjang 30 hari (satu bulan data pengukuran). Menurut Zervas (1999) untuk data observasi 30 hari NOS (National) dapat menyelesaikan perhitungan 23 konstanta harmonik, yaitu  $2Q(1)$ ,  $O(1)$ ,  $K(1)$ ,  $OO(1)$ ,  $2N(2)$ ,  $M(2)$ ,  $S(2)$ ,  $2SM(2)$ ,  $2MK(3)$ ,  $MK(3)$ ,  $M(4)$ ,  $MS(4)$ ,  $S(4)$ ,  $M(6)$ ,  $S(6)$ ,  $M(8)$ ,  $Q(1)$ ,  $M(1)$ ,  $J(1)$ ,  $N(2)$ ,  $L(2)$ ,  $M(3)$ , dan  $MN(4)$ .

Kota Bitung merupakan salah satu kota yang terdapat di Provinsi Sulawesi Utara. Kota Bitung memiliki aktivitas dalam gerak pembangunan dengan pemanfaatan laut serta aktivitas transportasi laut yang dapat dikatakan paling intensif dibanding dengan Kabupaten dan Kota lainnya di provinsi ini. Selain itu secara aktual di Kota Bitung terdapat pelabuhan laut terbesar di Provinsi Sulawesi Utara, yaitu Pelabuhan Samudera Bitung. Dengan demikian, informasi menyangkut kondisi pasut pada perairan ini sangat penting untuk terus dibangun.

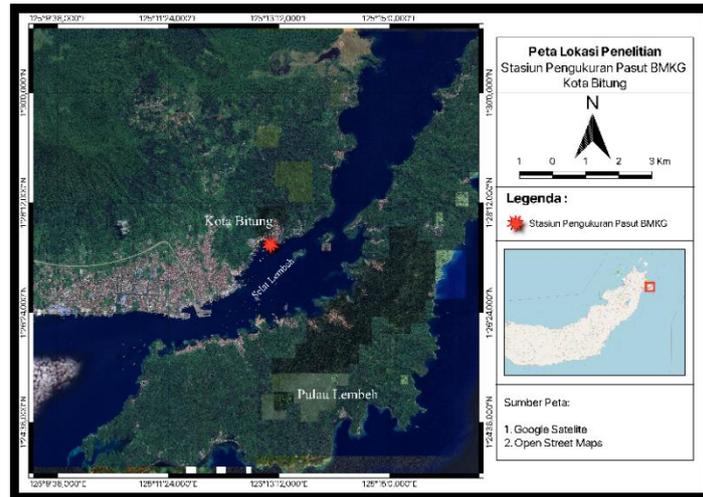
Penelitian menyangkut pasut khususnya untuk perairan sekitar Kota Bitung, telah dilakukan sebelumnya. Beberapa peneliti tersebut antara lain Rampengan (2013) dan Wuwung *et al.* (2023). Walaupun demikian, kajian

tentang pasut perairan sekitar Kota Bitung yang membicarakan menyangkut aspek prediksi dengan mempergunakan tambahan cukup banyak konstanta perairan dangkal, belum pernah dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan mengkaji akurasi hasil prediksi pasut dengan penambahan sejumlah konstanta harmonik perairan dangkal dan mengkaji fluktuasi amplitudo komponen harmonik utama akibat penambahan sejumlah komponen harmonik perairan dangkal dalam analisis harmonik pasut perairan sekitar Kota Bitung.

### **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini dilaksanakan dengan memanfaatkan data observasi dari basis data yang bersumber dari Stasiun Pasut BMKG Kota Bitung. Stasiun Pengukuran Pasut BMKG Kota Bitung terletak pada posisi geografis  $1^{\circ}27'7,0''$  U dan  $125^{\circ}13'3,9''$  T (Gambar 1). Stasiun pengukur pasut ini merupakan peralatan baru dari BMKG yang dipasang pada awal tahun 2023, menggantikan alat pengukuran lama yang sebelumnya berlokasi di tempat yang berbeda.

Pengolahan data pengukuran pasut dilakukan menggunakan Metode Kuadrat Terkecil (Least Square Method). Data yang digunakan merupakan data pasut yang diperoleh dari stasiun pengukuran pasut BMKG Kota Bitung pengukuran Januari, Februari dan Maret 2024 dengan interval pengukuran 1 jam. Metode Kuadrat Terkecil termasuk sebagai analisis harmonik pasut di samping metode Admiralty. Menurut Pugh & Woodworth (2014), perhitungan kuadrat terkecil



Gambar 1. Lokasi alat pengukur Pasut Stasiun BMKG Kota Bitung.

memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode lama, yaitu:

1. Kesenjangan dalam data diperbolehkan. Perhitungan dapat dilakukan hanya untuk waktu-waktu yang terdapat data hasil observasi.
2. Data sepanjang apa pun dapat digunakan dalam perhitungan, umumnya durasi bulanan atau tahunan dapat lengkap dianalisis.
3. Tidak ada asumsi yang dibuat mengenai data di luar interval yang dibuat.
4. Fenomena sementara dihilangkan – hanya variasi dengan fase koheren yang dipilih.
5. Perhitungan dapat diterapkan pada interval pengamatan yang sesuai (biasanya satu jam, atau 10 atau 6 menit).

Amplitudo dan fase setiap konstanta harmonik pasut yang ingin dicari, menurut Thomson and Emery (2014), dapat diselesaikan melalui penerapan formula :

$$x(t_n) = \bar{x} + \sum_{q=1}^M [A_q \cos(2\pi f_q t_n) + B_q \sin(2\pi f_q t_n)] + x_r(t_n)$$

Keterangan :

$x(t_n)$  = elevasi muka laut terukur pada waktu  $t = 1 \dots n$

$\bar{x}$  = nilai rata-rata data, dalam hal ini duduk tengah muka laut (*mean sea level*), yaitu  $Z_0$ .

$x_r$  = adalah bagian sisa deret waktu (yang mungkin mengandung konstituen harmonik jenis lain).

$A_q ; B_q$  = koefisien yang ingin dihitung pada persamaan.

$f_q$  = frekuensi setiap konstanta yang dilibatkan dalam perhitungan.

$t_n = n\Delta t$

Amplitudo diperoleh dari formula :

$$C_q = \sqrt{A_q^2 + B_q^2}$$

Beda fase diperoleh dari formula :

$$\phi_q = \tan^{-1}\left(\frac{B_q}{A_q}\right)$$

Perhitungan ini dapat diselesaikan melalui operasi matriks. Beberapa matriks yang harus dibentuk adalah matriks kolom yang berisi data hasil observasi, matriks parameter (berisi nilai 1 serta sinus dan cosinus dari ), dan matriks koefisien (yang diisi oleh nilai-nilai  $Z_0$  serta koefisien A dan B hasil perhitungan).

Penyelesaian dengan operasi matriks mengharuskan mencari matriks

kebalikan dari matriks parameter. Oleh karena matriks parameter bukan merupakan matriks bujursangkar, maka menurut Thomson & Emery (2014) koefisien  $A_q$  dan  $B_q$  harus diselesaikan dengan formula:

$$B = (X' \times X)^{-1} \times X' \times Y$$

Keterangan:

$X$  = Matriks Parameter

$Y$  = Matriks Observasi

$$B = \begin{pmatrix} A_q \\ B_q \end{pmatrix}$$

Akurasi data hasil prediksi dievaluasi dengan menghitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dengan formula menurut Chai & Draxler (2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$$

Keterangan:

$$e_i = \hat{y}_i - y_i$$

$\hat{y}_i$  = data prediksi ke-i

$y_i$  = data observasi ke-i

$n$  = banyaknya data

Di samping perhitungan nilai RMSE, akurasi dari data prediksi juga dievaluasi dengan menghitung nilai koefisien korelasi ( $r$ ) data observasi dan prediksi dengan formula menurut Medenhall *et al.* (2020), sebagai berikut:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

Keterangan:

$$S_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1}$$

$x_i$  = data observasi ke-i

$y_i$  = data prediksi ke-i

$\bar{x}$  = nilai rata-rata seluruh data observasi

$\bar{y}$  = nilai rata-rata seluruh data prediksi

$n$  = jumlah data

$S_x$  = standar deviasi data observasi

$S_y$  = standar deviasi data prediksi

Selain itu dilakukan juga perhitungan terhadap frekuensi relatif dari data yang memiliki selisih antara nilai hasil prediksi dan observasi < 3 cm dan < 6 cm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan duduk tengah muka laut ( $Z_0$ ) data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh 0,9743 – 0,9744 m untuk data Januari 2024; 1,0043 – 1,0045 untuk data Februari 2024; dan 1,0451 – 1,0453 untuk data Maret 2024. Hasil perhitungan ini cukup jauh bedanya dengan hasil perhitungan duduk tengah muka laut dari data Oktober 2022 sampai Februari 2023 oleh Wuwung *et al.* (2023) yang mendapatkan nilai antara 1,148 – 1,173 m. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pemasangan peralatan pengukur pasut yang baru memiliki elevasi nilai 0 (nol) yang sedikit berbeda dengan pemasangan peralatan pengukur yang lama. Sekalipun nilai duduk tengah muka laut bulanan memang berfluktuasi nilainya akibat faktor non-astronomis, tetapi perbedaannya tidak akan sangat besar.

### Akurasi Data Hasil Prediksi

Akurasi terhadap data prediksi menggunakan metode kuadrat terkecil awalnya dihitung dengan menggunakan empat konstanta yang menjadi dasar penentuan tipe pasut, yaitu M2, S2, K1, dan O1. Selanjutnya ditambahkan konstanta berikutnya, di mana yang ditetapkan sebagai konstanta urutan sesudah O1, adalah konstanta yang memberikan penurunan nilai RMSE terbesar. Penurunan nilai RMSE menjadi

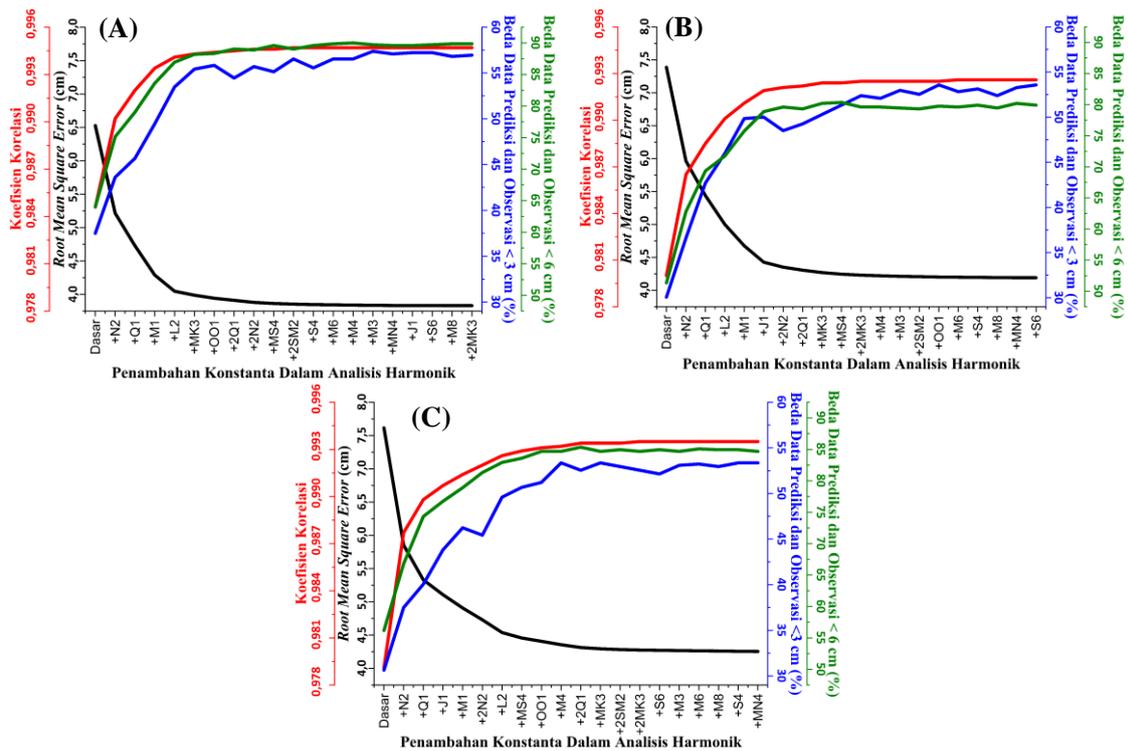
indikasi bahwa data prediksi dari pengolahan dengan metode kuadrat terkecil akurasi semakin mendekati data observasi. Visualisasi grafik untuk menampilkan akurasi data prediksi terhadap data observasi, ditampilkan pada Gambar 2.

Nilai RMSE pada Januari 2024 yang diperoleh dengan menggunakan empat konstanta dasar adalah sebesar 6,5273 cm. Nilai RMSE menjadi lebih baik (menjadi lebih kecil) dan masih tampak jelas perubahannya sampai pada penggunaan 13 atau 14 konstanta pasut dalam analisis harmonik. Selanjutnya penurunan nilai RMSE memang masih terus terjadi sampai pada penggunaan 23 konstanta pasut dalam analisis harmonik. Walaupun demikian, penurunan yang terjadi sudah sangat kecil jika dibandingkan dengan penurunan yang terjadi sebelumnya, sehingga hampir tidak dapat dilihat lagi penurunan yang terjadi pada grafik.

Berdasarkan hasil pengolahan untuk koefisien korelasi antara data prediksi dan data observasi menunjukkan bahwa penggunaan metode kuadrat terkecil dalam analisis harmonik menghasilkan data prediksi yang berkorelasi erat dengan data observasi. Hal ini bertolak dari koefisien korelasi yang diperoleh, sekalipun dengan analisis harmonik metode kuadrat terkecil yang hanya mempergunakan empat konstanta dasar (M2, S2, K1, dan O1), nilai yang diperoleh sudah sebesar 0,9832. Seperti diketahui bahwa nilai koefisien korelasi berada di antara -1 sampai 1, di mana koefisien korelasi mendekati nilai -1 atau 1 menyatakan korelasi yang kuat, sedangkan mendekati nilai 0 menyatakan korelasi yang lemah. Sekalipun korelasi

data prediksi dan observasi sudah erat sejak pengolahan data menggunakan empat konstanta dasar saja, tetapi nilai koefisien korelasi masih terus meningkat dengan penambahan konstanta pada perhitungan yang dilakukan. Peningkatan nilai koefisien korelasi masih dapat jelas terlihat pada grafik di Gambar 2 sampai pada penggunaan 8 konstanta dalam pengolahan dengan metode kuadrat terkecil. Sesudahnya peningkatan nilai koefisien korelasi masih terjadi tetapi sangat kecil, sehingga hampir tidak tampak peningkatannya pada grafik.

Peningkatan akurasi data prediksi juga ditunjukkan melalui peningkatan persentasi banyaknya data prediksi yang berbeda  $< 3$  cm dan  $< 6$  cm dengan data observasi. Walaupun demikian, peningkatan persentasi ini agak berbeda sifatnya dengan akurasi untuk nilai RMSE dan koefisien korelasi. Nilai RMSE akan semakin kecil dengan penambahan konstanta yang disertakan dalam analisis harmonik. Demikian juga dengan nilai koefisien korelasi, cenderung akan meningkat dengan penambahan konstanta yang diikutsertakan dalam analisis harmonik. Tetapi tidak demikian dengan besarnya persentasi banyaknya data prediksi yang bedanya  $< 3$  cm dan  $< 6$  cm dari data observasi. Melalui grafik pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa besarnya persentasi meningkat, baik untuk persentasi pada beda  $< 3$  cm maupun  $< 6$  cm, sampai pada penggunaan sekitar 10 konstanta dalam analisis harmonik. Sesudah itu, peningkatan persentasi tetap terjadi, tetapi diselingi dengan nilai persentasi yang menurun. Hal ini bukan berarti akurasi data prediksi menjadi turun, tetapi peningkatan akurasi terjadi pada beda data prediksi dan observasi  $\geq 6$  cm.



Gambar 2. Akurasi data prediksi Januari (A), Februari (B), dan Maret 2024 (C)

Akurasi data prediksi terhadap data observasi dengan kondisi mirip, juga diperlihatkan oleh hasil pengolahan data pasut Februari 2024 dan Maret 2024. Akurasi data prediksi yang diperoleh melalui pengolahan metode kuadrat terkecil mempergunakan data pasut Februari 2024 dan Maret 2024 secara umum menunjukkan kondisi yang mirip dengan Januari 2024. Walaupun demikian, jika diperhatikan lebih teliti, akurasi data prediksi pada Februari 2024 dan Maret 2024 sedikit di bawah prediksi Januari 2024 akurasinya. Hal ini dapat dilihat dari posisi grafik yang menunjukkan perubahan tempat nilai RMSE, koefisien korelasi, serta besarnya persentasi untuk beda < 3 cm dan < 6 cm. Dapat dilihat bahwa keempat sumbu koordinat pada gambar

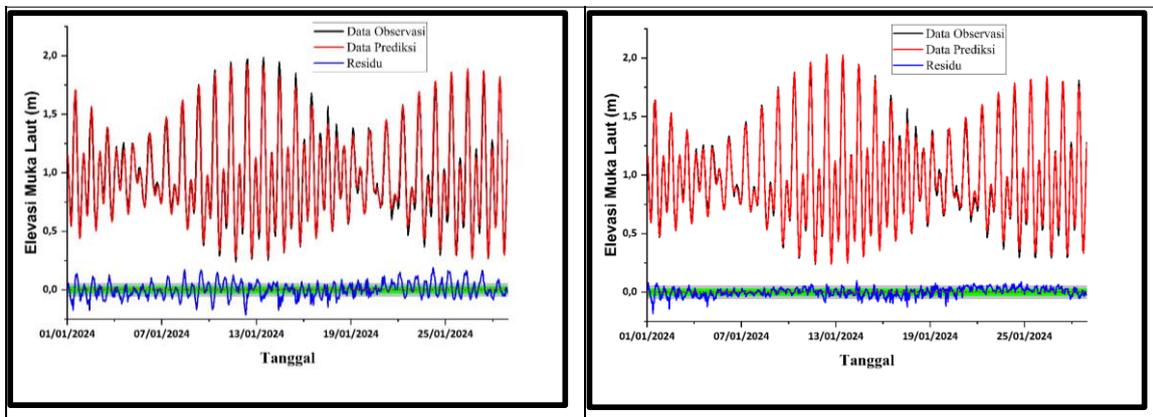
dibuat sama, sehingga perubahan posisi kurva dapat dilihat dengan jelas.

Perbedaan akurasi yang diperoleh pada pengolahan data pasut Januari, Februari, dan Maret 2024 kemungkinan muncul dari kualitas pencatatan data oleh alat ukur yang dapat menurun oleh pengaruh faktor cuaca. Kondisi cuaca yang kurang baik dapat mengganggu kualitas pencatatan data oleh alat ukur. Gangguan oleh faktor cuaca merupakan salah satu hambatan yang mengakibatkan terjadinya penurunan akurasi dalam melakukan prediksi pasut.

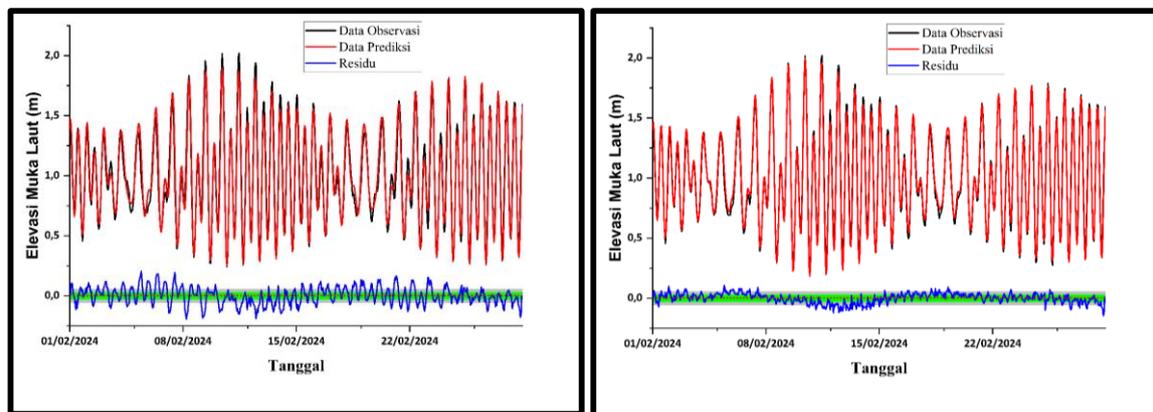
Sekalipun akurasi prediksi yang dihasilkan melalui pengolahan data Februari dan Maret 2024 lebih kecil dibanding pada Januari 2024, tetapi kuantitas perbaikan akurasi dengan

Tabel 1. Akurasi data prediksi Januari – Maret 2024.

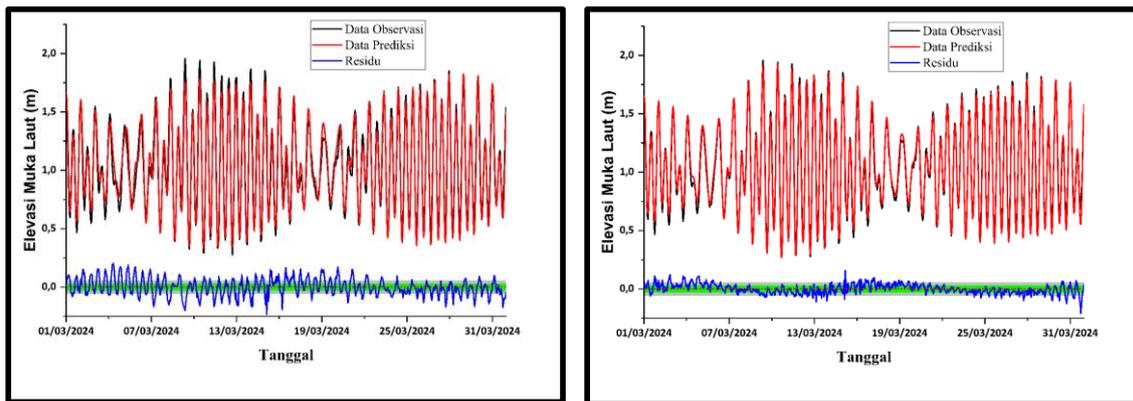
Bulan	Variabel	Konstanta Dasar	23 Konstanta	Selisih
Januari 2024	RMSE (cm)	6,5273	3,8323	2,6950
	Koefisien Korelasi	0,9833	0,9934	0,0101
	Beda < 3 cm (%)	37,5000	56,9440	19,4440
	Beda < 6 cm (%)	64,0280	89,8610	25,8330
Februari 2024	RMSE (cm)	7,3869	4,1902	3,1967
	Koefisien Korelasi	0,9799	0,9926	0,0127
	Beda < 3 cm (%)	30,0600	53,5710	23,5110
	Beda < 6 cm (%)	55,6550	84,3750	28,7200
Maret 2024	RMSE (cm)	7,6145	4,2558	3,3587
	Koefisien Korelasi	0,9778	0,9922	0,0144
	Beda < 3 cm (%)	30,6450	53,3600	22,7150
	Beda < 6 cm (%)	56,1830	84,6770	28,4940



Gambar 3. Muka laut observasi, prediksi dan residu Pasut Januari 2024 menggunakan Konstanta M2, S2, K1 dan O1 (kiri) dan 23 Konstanta (kanan).



Gambar 4. Muka laut observasi, prediksi dan residu Pasut Februari 2024 menggunakan Konstanta M2, S2, K1 Dan O1 (kiri) dan 23 Konstanta (kanan).



Gambar 5. Muka laut observasi, prediksi dan residu Pasut Maret 2024 menggunakan Konstanta M2, S2, K1 dan O1 (kiri) dan 23 Konstanta (kanan).

penambahan konstanta pasut, lebih besar terjadi pada pengolahan data pasut kedua bulan tersebut. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada ringkasan data yang disajikan pada Tabel 1.

Akurasi data prediksi yang semakin baik menghasilkan grafik elevasi pasut semakin berimpit dengan data observasi. Disamping grafik elevasi muka laut data prediksi dan observasi, dalam analisis harmonik, disertakan grafik residu yang merupakan selisih antara data prediksi terhadap data observasi. Visualisasi data observasi, data prediksi dan residu pasut ditampilkan pada Gambar 3 sampai Gambar 5.

Kurva elevasi muka laut yang dibentuk oleh data observasi dan data prediksi yang tampak pada Gambar 3 sampai Gambar 5, semakin berimpit untuk hasil analisis menggunakan 23 konstanta pasut dibanding hasil analisis dengan empat konstanta utama saja. Hal tersebut terjadi baik untuk data Januari, Februari, maupun Maret 2024. Demikian juga dengan kurva residu, fluktuasinya di sekitar garis nilai 0 (nol) semakin kecil.

Akurasi prediksi hasil analisis harmonik menggunakan 23 konstanta pasut pada Januari 2024 yang memiliki

akurasi terbaik, juga dapat jelas dilihat pada gambar yang disajikan. Kurva data prediksi dan observasi Januari 2024 (Gambar 3) tampak lebih berimpit dibanding data Februari 2024 (Gambar 4) dan Maret 2024 (Gambar 5). Keadaan tersebut semakin jelas tampak pada tampilan grafik residu pada masing-masing gambar.

**Amplitudo Konstanta Pasut**

Selama penambahan konstanta pasut dalam pengolahan data, terjadi perubahan terhadap nilai amplitudo M2, S2, K1, dan O1. Perubahan terhadap amplitudo dari keempat konstanta ini sangat berkaitan erat bukan saja dalam hal perubahan nilai Formzhal, tetapi terlebih lagi dalam aplikasi atau penggunaan data pasut untuk kepentingan penentuan muka air laut rencana (reference datum). Oleh karena itu, kestabilan nilai amplitudo keempat konstanta ini sangat penting dalam aplikasi data pasut hasil analisis harmonik. Fluktuasi nilai amplitudo keempat konstanta ini ditunjukkan pada Gambar 6.

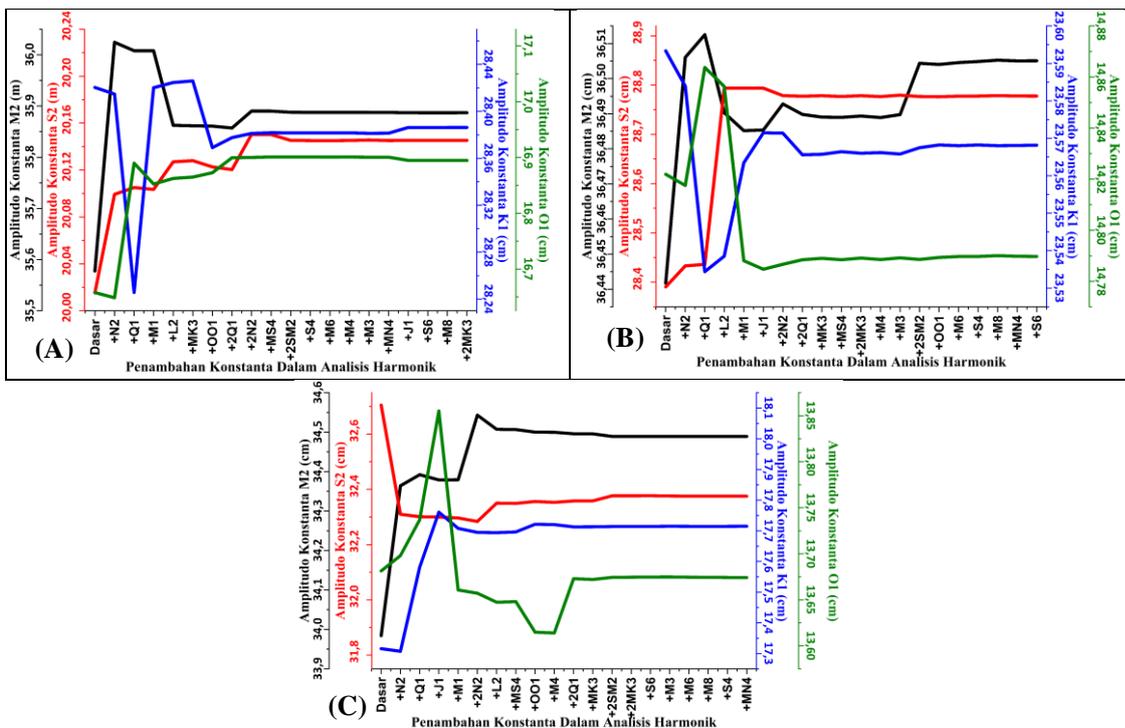
Berdasarkan grafik fluktuasi amplitudo pada Gambar 6, tampak bahwa pada pengolahan data pasut dengan

melibatkan konstanta harmonik yang sedikit, fluktuasi amplitudo M2, S2, K1, dan O1, tampak sangat besar. Fluktuasi nilai amplitudo akan relatif sangat kecil dengan penambahan konstanta dalam pengolahan yang dilakukan. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa penambahan konstanta dalam analisis harmonik khususnya dengan metode kuadrat terkecil akan membantu menghasilkan amplitudo konstanta penting yang lebih representatif untuk dipergunakan dalam aplikasi data pasut.

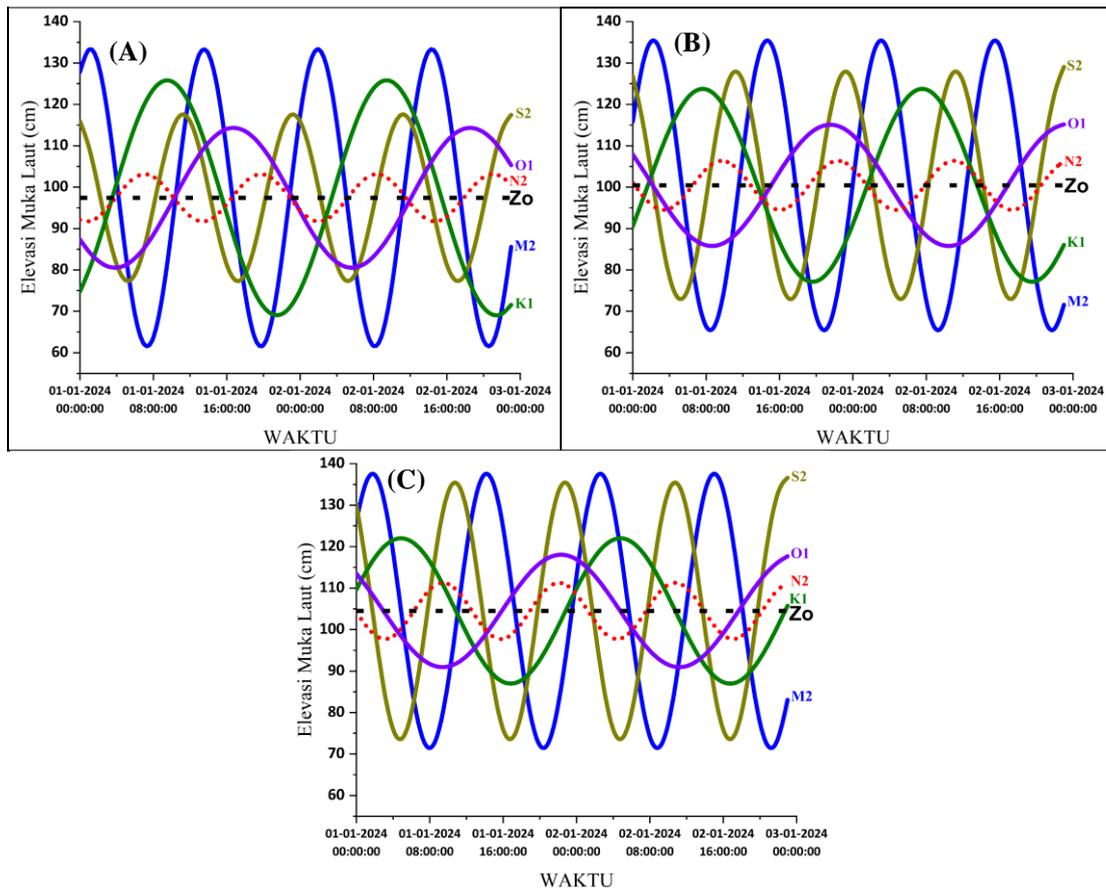
Elevasi muka laut yang terjadi pada suatu waktu tertentu adalah kumulatif dari semua gelombang pasut yang dinyatakan lewat perwakilan sejumlah konstanta pasut dan faktor non-prediktif yang diakibatkan

oleh kondisi meteorologi. Ilustrasi kontribusi setiap konstanta yang digunakan dalam analisis pasut pada penelitian ini terhadap kondisi pasut perairan sekitar Kota Bitung disajikan pada Gambar 6.

Gelombang pasut K1 dan O1 mengalun dengan periode yang lebih besar dibanding M2 dan S2. Hal ini dapat jelas tampak pada ilustrasi yang disajikan pada Gambar 7. Sebaliknya gelombang pasut M2 dan S2 umumnya mengalun dengan amplitudo yang lebih besar dari K1 dan O1. Walaupun demikian, di perairan sekitar Kota Bitung ini, tampaknya terkadang gelombang K1 dapat memiliki amplitudo yang lebih besar dibanding S2, seperti yang terjadi pada Januari 2024.



Gambar 6. Fluktuasi Amplitudo Konstanta M2, S2, K1, O1 Untuk Januari (A), Februari (B), dan Maret 2024 (C).

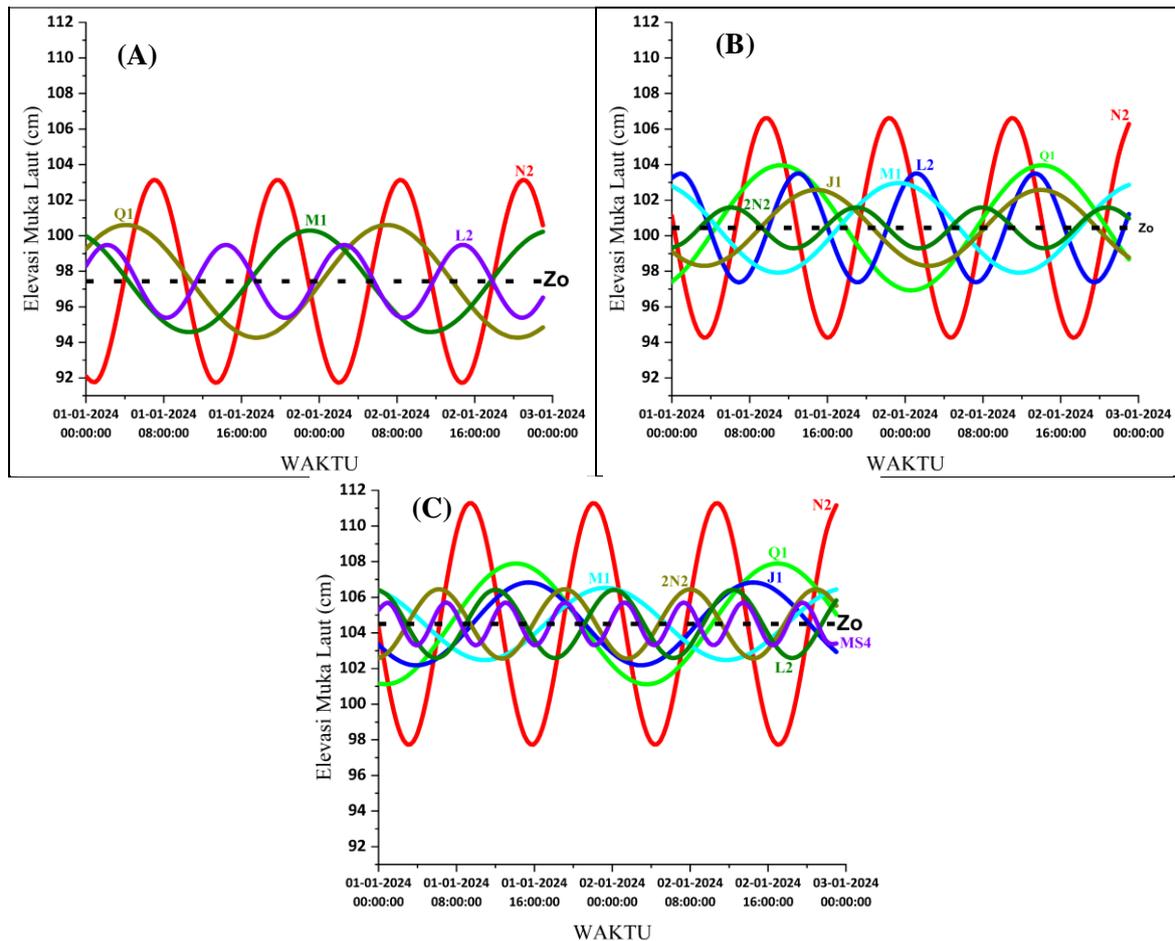


Gambar 7. Alunan gelombang Pasut M2, S2, K1, dan O1 pada Januari (A), Februari (B), dan Maret 2024 (C)

Gelombang N2 yang digambarkan dengan garis putus-putus berwarna merah dimaksudkan untuk memberi perbandingan dengan ilustrasi gelombang pasut lainnya yang akan disajikan selanjutnya. Gelombang-gelombang pasut berikutnya yang dihasilkan oleh sejumlah konstanta pasut lain yang diikutsertakan dalam pengolahan dengan metode kuadrat terkecil tidak dapat digambarkan bersama karena amplitudonya yang kecil.

Banyaknya konstanta pasut menurut besaran amplitudo yang berada pada kisaran kurang dari 10 cm tetapi lebih

besar dari 1 cm, berbeda-beda menurut perhitungan pada data pasut bulanan. Untuk data pasut Januari hanya 4 konstanta, untuk Februari terdapat 6 konstanta, sedangkan untuk Maret terdapat 7 konstanta. Hal ini menunjukkan bahwa peran konstanta tambahan, terutama untuk konstanta perairan dangkal dalam alunan pasut di suatu perairan berbeda-beda menurut waktu. Beberapa konstanta lainnya yang disertakan dalam kajian ini memiliki amplitudo sangat kecil, hanya dalam ukuran beberapa milimeter saja.



Gambar 8. Beberapa konstanta dengan Amplitudo Antara 1–10 cm pada hasil perhitungan dengan data Pasut Januari (A), Februari (B), dan Maret 2024 (C).

**KESIMPULAN**

Berdasarkan kajian yang dilakukan terhadap data pasut Januari, Februari, dan Maret 2024 perairan sekitar Kota Bitung disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan sejumlah konstanta harmonik perairan dangkal analisis pasut sekitar Kota Bitung meningkatkan akurasi data prediksi. Nilai RMSE terbaik untuk data bulan Januari sebesar 3,8323 cm; Februari 4,1902 cm; dan Maret 4,2558 cm. Demikian juga nilai koefisien korelasi meningkat dan persentasi banyaknya data prediksi yang memiliki beda < 3 cm dan < 6 cm dengan data observasi menjadi lebih besar.

2. Pada pengolahan dengan melibatkan konstanta harmonik yang sedikit, amplitudo konstanta M2, S2, K1, dan O1 relatif berfluktuasi. Penambahan sejumlah konstanta harmonik dalam analisis harmonik yang dilakukan menghasilkan amplitudo konstanta M2, S2, K1, dan O1 yang relatif lebih konstan nilainya.

**DAFTAR PUSTAKA**

Ablain, M., Legeais, J.F., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H.B., Besveniste J., Cazenave, A. 2017. Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales. *Surv Geophys.* 30, 7-31.  
 Chai, T., Draxler, R.R. 2014. Root Mean Square Error (RMSE) or Mean

- Absolute Error (MAE)? – Arguments Against Avoiding RMSE in The Literature. *Geosci. Model Dev.* 7, 1247–1250.
- Forrester, W.D. 1983. Canadian Tidal Manual. Department of Fisheries and Oceans, Canadian Hydrographic Service, Ottawa, Ont. Canada.
- NOAA. 2003. Computational Techniques for Tidal Datums Handbook. NOAA Special Publications NOS CO-OPS 2.
- Pugh, D., Woodworth, P. 2014. Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes. Cambridge University Press.
- Rampengan, R.M. 2013. Amplitudo Konstanta Pasang Surut M2, S2, K1, dan O1 di Perairan Sekitar Kota Bitung Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Platax*. 1(3), 118–124.
- Suryati, Supriharyono, Anggoro, S. 2019. Pengelolaan Wilayah Pesisir Terpadu. UNDIP Press. Semarang.
- Talley, L.D., Pickard, G.L., Emery, W.J., Swift, J.H. 2011. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Sixth Edition. Elsevier Ltd. USA.
- Thomson, R.E., Emery W.J., 2014. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier B.V. All Right Reserved. Amsterdam, Netherlands.
- Thorpe, S.A. 2009. Encyclopedia of Ocean Science: Element of Physical Oceanography. Elsevier Ltd. Italy.
- UNESCO, 1985. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Vol. I – Basic Procedures. Manual and Guides – 14. Intergovernmental Oceanographic Commission.
- UNESCO, 2016. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation Radar Gauges. Volume V. Manual and Guides 14. Intergovernmental Oceanographic Commission. USA.
- Wuwung, V., Rampengan, R.M., Manengkey, H.W., Bara, R.A., Djamaluddin, R., Losung, F. 2023. Akuisisi Data Pengukuran Pasang Surut di Perairan Sekitar Kota Bitung Untuk Keperluan Prediksi. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 11(2), 614–622.
- Yuliardi, A.Y., Heltria, S., Taj K., Natih, N.M.N. 2022. The Amplitudes and Phases of Tidal Constituents from Harmonic Analysis at Two Stations in The Gaspar Strait of Bangka Belitung. *Omni-Akuatika*. 18(1), 10-19.
- Zervas, C. 1999. Tidal Current Analysis Procedures and Associated Computer Programs. NOAA Technical Memorandum NOS CO-OPS 0021. National Oceanic And Atmospheric Administration.