

KOMPARASI HASIL PENGOLAHAN PASANG SURUT AIR LAUT METODE *ADMIRALTY* DAN METODE *LEAST SQUARE* DI PERAIRAN SEKITAR PELABUHAN BENOA BALI

Nico Kharollis¹, Levana Apriani, S.T., M.T.²

¹Mahasiswa Teknik Geodesi Universitas Winaya Mukti, Bandung

²Dosen Pembimbing Teknik Geodesi Universitas Winaya Mukti, Bandung

Abstrak

Indonesia sebagai negara maritim memiliki sekitar 70 persen wilayahnya berupa lautan dan menjadikan laut sebagai jalur utama perdagangan serta sektor strategis dalam pengembangan pariwisata. Salah satu Pelabuhan yang berperan besar dalam sektor perdagangan dan pariwisata maritim nasional adalah Pelabuhan Benoa di Bali. Tingginya aktivitas dan pengembangan infrastruktur di wilayah ini menjadikan kebutuhan akan informasi pasang surut yang akurat menjadi sangat penting, baik untuk keselamatan navigasi, operasional pelabuhan, maupun perencanaan pembangunan.

Penelitian dilakukan dengan membandingkan dua metode analisis harmonik pasang surut, yaitu metode *admiralty* dan *least square*, guna mengetahui tingkat akurasi prediksi pasut di wilayah perairan Benoa. Pengamatan pasut dari stasiun pasut real-time Pelabuhan Benoa, yang direkam selama 29 hari pada periode 1 hingga 29 Mei 2024, dengan interval pencatatan 60 menit. Hasil prediksi dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan perbandingan visual antara kurva pasang surut yang diprediksi dan diamati.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *least square* memberikan akurasi prediksi yang lebih tinggi yaitu 4.572 cm dibandingkan metode *admiralty* yaitu 23.792 cm, baik dari sisi kesalahan statistik maupun kesesuaian grafik prediksi terhadap data pengamatan. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pemilihan metode yang dianggap paling sesuai di perairan dengan aktivitas kapal yang tinggi seperti Pelabuhan Benoa Bali dan juga perairan dengan karakteristik yang serupa.

Kata Kunci: *admiralty*, *least square*, pengamatan pasut.

Abstract

Indonesia, as a maritime country, has approximately 70 percent of its territory covered by oceans, making the sea a primary route for global trade and a strategic sector for tourism development. One of the ports which plays a significant role in both maritime trade and tourism is Benoa Port in Bali. The high level of activity and ongoing infrastructure development in this area make accurate tidal information essential for navigation safety, port operations, and infrastructure planning.

The method employed in this study is harmonic tidal analysis based on tidal observation data from the Benoa Port real-time tide gauge station. The data were recorded over a 29-day period, from May 1 to May 29, 2024, with a recording interval of 60 minutes. The prediction results were evaluated using Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and visual comparison between predicted and observed tidal curves.

The results of the study show that the least square Method provides higher prediction accuracy of 4.572 cm compared to the Admiralty Method of 23.792 cm, both in terms of statistical errors and the graphical fit to the observed data. The findings of this study can serve as a basis for selecting the most appropriate tidal analysis method for busy maritime areas such as Benoa Port, Bali, and other regions with similar characteristics.

Keywords: admiralty, least square, sea level monitoring.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang dikenal sebagai negara maritim terbesar di dunia, dengan sekitar 70% wilayahnya berupa lautan. Letak geografis yang strategis menjadikan Indonesia sebagai jalur penting dalam perdagangan global, di mana lebih dari 90% volume perdagangan dunia dilakukan melalui transportasi laut. Selain sebagai jalur logistik utama, sektor maritim Indonesia juga memiliki potensi besar di bidang pariwisata. Ribuan pulau dengan keindahan bahari menjadi magnet wisatawan domestik maupun mancanegara.

Salah satu wilayah perairan yang memiliki peran penting dalam sektor perdagangan dan pariwisata adalah Pelabuhan Benoa di Bali. Pelabuhan ini merupakan salah satu pelabuhan tersibuk di Indonesia bagi, dengan mobilitas tinggi baik untuk kapal kargo, kapal penumpang, maupun kapal pesiar (*cruise*) internasional. Data dari PT Pelindo Regional III mencatat bahwa pada tahun 2022, terdapat 14 kapal pesiar yang bersandar di Pelabuhan Benoa, membawa hampir 7.000 penumpang. Jumlah ini meningkat drastis pada tahun 2023, dengan 48 kapal pesiar yang bersandar dan mengangkut sekitar 77.864 wisatawan mancanegara. Peningkatan ini menunjukkan peran strategis Pelabuhan Benoa sebagai gerbang utama pariwisata maritim di Indonesia, dan seiring dengan meningkatnya arus kunjungan dan aktivitas ekonomi di kawasan ini, pemerintah terus mendorong pembangunan dan pengembangan infrastruktur pelabuhan demi mendukung efisiensi dan keselamatan pelayaran.

Dalam konteks pengembangan pelabuhan dan keselamatan navigasi, analisis pasang surut menjadi aspek yang sangat vital. Informasi pasut tidak hanya berperan dalam penentuan waktu sandar dan olah gerak kapal, tetapi juga penting dalam desain struktur pelabuhan, reklamasi, hingga kajian dampak lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis pasang surut yang akurat dan sesuai dengan karakteristik lokal perairan Benoa.

Pengetahuan terhadap ilmu pasang dan surut air laut sangat berguna bagi berbagai keperluan, terutama dalam ilmu hidrografi yang memiliki tujuan utama yaitu keselamatan navigasi pelayaran di laut. Dalam ilmu hidrografi pasang dan surut air laut digunakan untuk menentukan muka air terendah pada suatu pengamatan sehingga menjadi acuan dalam mencantumkan nilai kedalaman di peta laut yang digunakan untuk berlayar (*chart datum*) sehingga nilai kedalaman yang ditampilkan pada peta laut merupakan nilai paling aman yang digunakan untuk bernavigasi oleh para pelaut. Selain digunakan untuk

menentukan *chart datum*, Menurut Thomson amplitudo dan fase dari setiap komponen pasut yang dihitung dari pengamatan dapat diketahui dari teori analisis harmonik, maka pasang surut muka air laut dapat diprediksikan pada setiap tempat di bumi. Berbagai metode analisis pasut dapat digunakan, namun efektivitas dan ketepatannya bisa berbeda tergantung kondisi lokal dan kualitas data. Oleh karena itu, diperlukan kajian perbandingan antara metode analisis pasut konvensional seperti metode *admiralty* dengan metode numerik modern seperti *least square*, agar dapat diketahui metode yang paling representatif untuk digunakan di wilayah perairan Benoa.

Penelitian ini menggunakan data hasil pengamatan dari stasiun pasang surut real-time di Pelabuhan Benoa. Waktu pengamatan yang digunakan adalah selama 29 hari, dimulai dari tanggal 2 hingga 31 Mei 2024, dengan interval perekaman setiap 60 menit. Pemilihan rentang waktu tersebut didasarkan pada hasil grafik dari Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) yang menunjukkan bahwa periode tersebut memiliki data yang relatif bersih dari *noise* dan terstruktur dengan baik, sehingga dinilai representatif untuk dianalisis lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan komparasi antara dua metode analisis pasut, yaitu metode *admiralty* yang bersifat konvensional, dan metode *least square* yang menggunakan pendekatan numerik, untuk mengetahui metode mana yang lebih akurat dalam merepresentasikan karakteristik pasang surut di wilayah tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, karena melibatkan data numerik dan metode matematis untuk menganalisis fenomena pasang surut laut. Pendekatan ini bertujuan untuk mengukur dan mengevaluasi seberapa akurat masing-masing metode (*admiralty* dan *least square*) dalam memodelkan serta memprediksi pasang surut berdasarkan data observasi. Metode kuantitatif dipilih karena sesuai dengan kebutuhan pengolahan data numerik dan evaluasi statistik hasil model.

Berikut ini merupakan tahapan atau proses pengolahan data yang telah dilakukan selama penelitian ini berlangsung.

1. Data diperoleh dari website milik IOC, yaitu data perekaman setiap 5 menit di stasiun pasang surut *real-time*, data dengan interval 5 menit tersebut dipersempit menjadi data dengan interval 1 jam selama 29 hari (1–29 Mei 2024) Data diunduh dalam format digital (CSV) dan kemudian divalidasi untuk memastikan kelengkapan dan kualitasnya. Dengan demikian terdapat 696 data yang nantinya akan dianalisis komponen harmonik pasang surut-nya.
2. Pengolahan metode *admiralty* menggunakan perangkat lunak *spreadsheet* atau perangkat pengolahan angka lainya, dengan fokus pada perhitungan manual terhadap komponen-komponen utama pasang surut seperti M2, S2, K1, dan O1. Mengingat data yang digunakan adalah 29 hari dengan interval selama 1 jam, sehingga nantinya akan diperoleh 10 komponen pasang surut utama, 10 Komponen pasang surut utama menurut NOAA *Tidal Constituents*.
3. Pengolahan metode *least square* adalah menggunakan program pengolahan pasut di perangkat lunak komputasi matriks, program pasut yang digunakan sendiri adalah perangkat yang dikembangkan oleh Pawlowicz, Beardsley, dan Lentz (2002),

Pada tahapan analiasi data, Perbandingan statistik dilakukan menggunakan dua parameter statistik untuk mengukur tingkat kesalahan (*residual error*), yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Harmonik Pasang Surut

Hasil analisis pasang surut adalah meliputi komponen pasang surut yang berupa nilai amplitudo dan fase dari metode *admiralty* dan komponen pasang surut berupa amplitudo dan fase dari hasil analisis dengan metode *least square*. Analisis pasang surut menggunakan metode *admiralty* menghasilkan sejumlah komponen pasang surut utama berdasarkan pendekatan harmonik klasik yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel. 1. Komponen Harmonik dengan Metode *Admiralty*

Komponen Hasil Metode <i>Admiralty</i>			
No	Komponen	Amplitudo (cm)	Fase (°)
1	So	246.2	
2	M2	64.6	48.4
3	S2	36.1	104.8
4	N2	9.6	22.4
5	K2	8.3	104.8
6	K1	24.0	179.3
7	O1	15.3	160.6
8	P1	7.9	179.3
9	M4	0.7	221.4
10	MS4	0.4	251.4

Metode *least square* dengan bantuan program pengolahan pasang surut di perangkat lunak komputasi matriks berhasil mengidentifikasi komponen pasang surut dominan dari data yang sama. Proses fitting dilakukan terhadap seluruh rentang data dan menghasilkan parameter amplitudo dan fase (pha) yang lebih presisi secara numerik dibanding metode *admiralty*. Output T_TIDE mencakup informasi frekuensi, dan kecepatan sudut dari setiap komponen. Komponen ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel. 2. Komponen Harmonik dengan Metode *Least Square*

Komponen Hasil Metode <i>Least Square</i>			
No	Komponen	Amplitudo (cm)	Fase (°)
1	So	246.2	
2	M2	64.17	52.14
3	S2	29.39	106.96
4	N2	9.34	16.72
5	K2	8	129.36
6	K1	23.34	179.27
7	O1	15.49	161.84
8	P1	7.72	186.34
9	M4	0.97	223.34
10	MS4	0.72	243.4

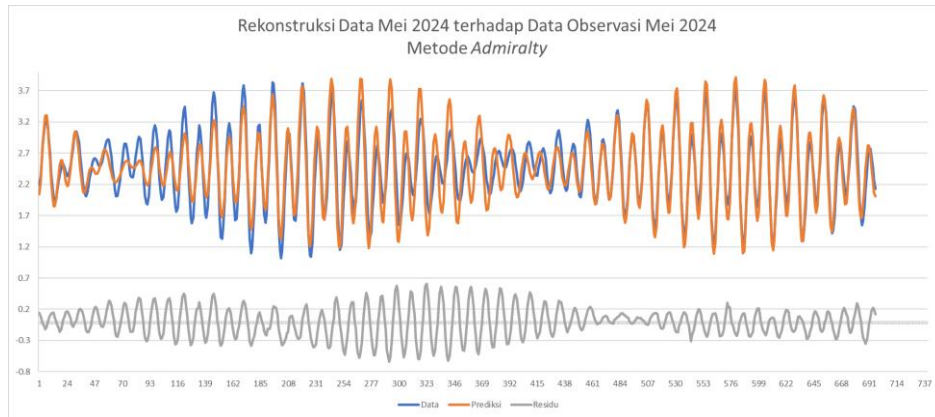
Hasil komponen pasang surut perhitungan perangkat komputasi juga di validasi menggunakan perangkat matriks lain dengan versi yang lebih tinggi, walaupun hasil memiliki nilai yang sedikit berbeda terutama pada komponen K2, dan P1 karena ada penyesuaian persamaan, namun konsistensi dapat ditunjukkan pada komponen M2, S2, K1, dan O1 yang dinilai sudah cukup untuk memastikan perangkat perhitungan matriks sudah sesuai persamaan yang dijelaskan sebelumnya.

Tipe Pasang Surut

Tipe pasang surut diidentifikasi dengan menghitung bilangan Formzal menggunakan persamaan formzal, komponen dari analisis metode *admiralty* memperoleh nilai Formzal sebesar 0.389, dan komponen dari analisis metode *least square* memperoleh nilai Formzal sebesar 0.415. kedua nilai formzal mengindikasikan bahwa perairan Pelabuhan Benoa termasuk tipe pasut campuran dominan setengah harian, atau dapat disederhanakan sebagai semi-diurnal.

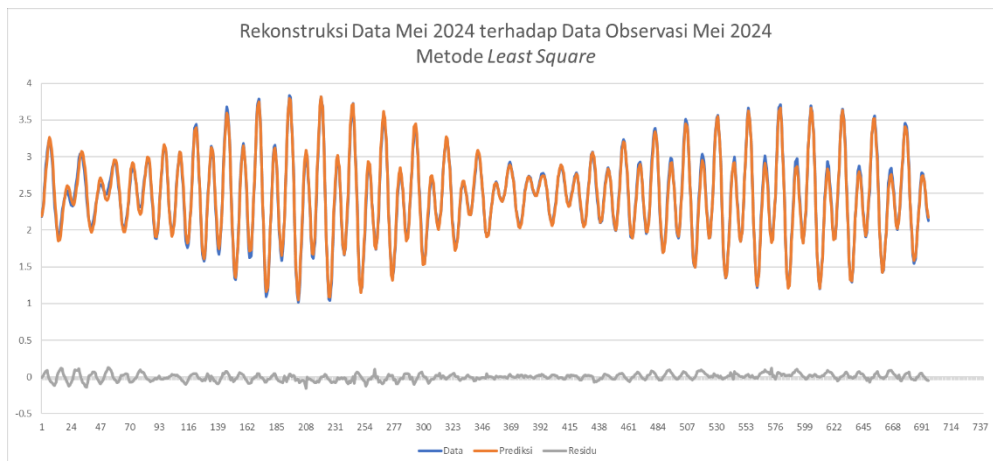
Hasil Grafik Rekonstruksi Pasut Terhadap Data Observasi

Rekonstruksi pasut merupakan langkah untuk memvalidasi hasil analisis harmonik dengan membandingkan hasil prediksi muka air laut terhadap data observasi. Dengan menggunakan parameter amplitudo dan fase dari komponen pasut yang telah diperoleh sebelumnya, dilakukan pemodelan ulang muka air laut untuk melihat sejauh mana model tersebut mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya. Grafik rekonstruksi pasut dengan metode *admiralty* ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Grafik Rekonstruksi Pasut Metode *Admiralty* dan Perbandingan dengan Observasi

Prediksi pasut dari hasil komponen *least square* juga direkonstruksi dan dibandingkan dengan data observasi. Secara umum, hasil prediksi menunjukkan kesesuaian yang lebih baik terhadap data aktual. grafik perbandingan data prediksi dan data observasi diperlihatkan sebagai gambar 2.



Gambar 2. Grafik Rekonstruksi Pasut Metode *Least Square* dan Perbandingan dengan Observasi

Berdasarkan hasil penggambaran grafik posisi muka air laut dari jam ke-1 sampai jam ke-696, terlihat sekitar jam ke-195 pada tanggal 9 Mei merupakan pasang tertinggi dengan ketinggian 3.835 m, hal ini dikarenakan bulan memasuki fase *new moon* pada saat *spring tides*, begitu pula pada tanggal 24 Mei (data ke-576) kembali mengalami pasang tertinggi karena bulan memasuki fase *full moon*. Berdasarkan data ini dapat dibuktikan bahwa teori pasang surut air laut sangat berpengaruh dengan fase bulan adalah benar.

Hasil Analisis Statistik

Pengujian secara visual juga dilakukan pengujian dengan analisis statistic, dalam hal ini menggunakan *Root Mean Square* (RMSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE), tabel 3 dan tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan nilai RMSE dan MAE dari masing masing metode serta beberapa variabel signifikan lainnya,

Tabel 3. Hasil Pengujian Statistik dari Metode *Admiralty*

<i>Admiralty</i>		
Pengujian	<i>Meters</i>	<i>Centimeters</i>
RMSE	0.238	23.792
MAE	0.190	19.049
Residu Maksimum	0.641	64.110

Tabel 4. Hasil Pengujian Statistik dari Metode *Least Square*

<i>Least Square</i>		
Pengujian	<i>Meters</i>	<i>Centimeters</i>
RMSE	0.046	4.572
MAE	0.036	3.611
Residu Maksimum	0.160	16.000

Berdasarkan hasil perhitungan RMSE dan MAE dari kedua hasil rekonstruksi ulang data observasi pasang surut, metode *least square* mendapatkan hasil yang lebih kecil jika dibandingkan hasil perhitungan RMSE dan MAE berdasarkan metode *admiralty*.

Datum Vertikal hasil Analisis Harmonik

Analisis harmonik pasut tidak hanya memberikan informasi mengenai komponen-komponen pasut utama, tetapi juga memungkinkan penentuan datum vertikal sebagai referensi penting dalam survei hidrografi, pemetaan laut, dan penentuan elevasi pada peta laut. Datum vertikal yang dimaksud mencakup *Mean Sea Level* (MSL), *Highest High Water Level* (HHWL), *Lowest Low Water Level* (LLWL), *Mean High Water Level* (MHWL), dan *Mean Low Water Level* (MLWL). Ke-lima datum vertikal tersebut di hitung dengan penjumlahan komponen harmonik yang dijelaskan dalam bab sebelumnya. Berdasarkan cara perhitungan tersebut, maka hasil datum vertikal dari masing-masing metode disajikan pada tabel 5 dan tabel 6:

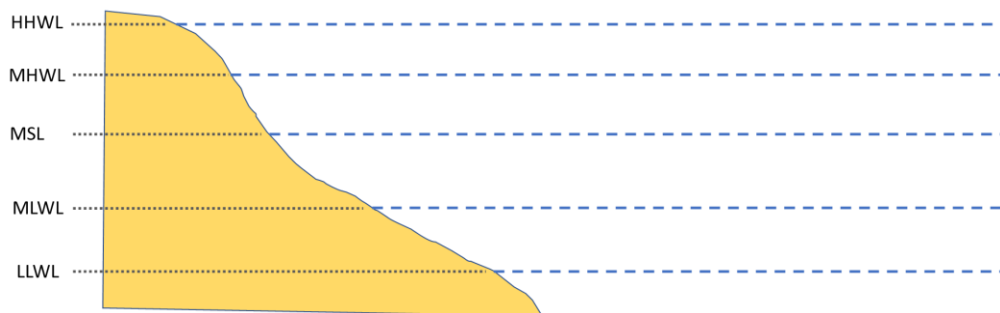
Tabel 5. Datum Vertikal dengan Metode *Admiralty*

<i>Admiralty</i>		
No.	Datum	Hasil (cm)
1.	Higher High Water Level	306.8
2.	Mean High Water Level	267.6
3.	Measn Sea Level	246.2
4.	Mean Low Water Level	66.1
5.	Lower Low Water Level	26.9

Tabel 6. Datum Vertikal dengan Metode *Least Square*

<i>Least Square</i>		
No.	Datum	Hasil (cm)
1.	Higher High Water Level	291.5
2.	Mean High Water Level	252.7
3.	Mean Sea Level	246.2
4.	Mean Low Water Level	65.6
5.	Lower Low Water Level	26.8

Data hasil datum vertikal ini selanjutnya dapat digunakan untuk kepentingan perencanaan pembangunan Pelabuhan, perencanaan kapal yang akan bersandar di Pelabuhan Benoa, maupun untuk menggabungkan data batimetri dan data topografi di Pelabuhan Benoa, Bali. Ilustrasi posisi setiap datum vertikal terhadap tepi pantai ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Posisi Datum Vertikal terhadap Tepi Pantai

Datum vertikal pasang surut adalah referensi tinggi muka air laut yang digunakan sebagai acuan dalam pengukuran kedalaman laut (batimetri), penetapan elevasi pantai, dan konstruksi maritim. MHWL biasanya digunakan dalam perencanaan infrastruktur pantai seperti dermaga atau tanggul laut untuk memperhitungkan potensi banjir rob. MHWL digunakan sebagai batas atas dari area pasang surut, misalnya untuk penentuan garis pantai atau zona sempadan pantai dalam peraturan tata ruang wilayah pesisir. MSL adalah datum paling umum digunakan sebagai referensi vertikal dalam sistem koordinat geodetik, pemetaan topografi, dan survei sipil. Di beberapa negara, MSL dijadikan datum vertikal nasional. MLWL digunakan sebagai acuan untuk menentukan batas bawah pasang surut atau perhitungan desain kedalaman kolam pelabuhan pada kondisi operasional, sedangkan LLWL biasa digunakan untuk chart datum pada peta laut, yakni sebagai referensi nol kedalaman laut. LLWL memberi margin konservatif agar kapal tidak kandas saat laut surut ekstrem. Angka vertikal datum nantinya juga dapat dikonversi ke tinggi ortometrik berdasarkan deskripsi titik kontrol terdekat.

4. KESIMPULAN

Metode *least square* menggunakan program pengolahan pasut di perangkat lunak komputasi matriks memberikan hasil yang lebih akurat dalam merekonstruksi data pasang surut dibandingkan metode *admiralty* dengan perangkat lunak *spreadsheet*. Hal ini

dibuktikan dari hasil evaluasi statistik di mana nilai *Root Mean Square* (RMSE) yaitu 4.572 cm dan *Mean Absolute Error* (MAE) yaitu 3.611 cm, nilai ini jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil metode *admiralty* yaitu dengan nilai RMSE adalah 23.792 cm dan nilai MAE 19.049 cm.

Hasil perhitungan Bilangan Formzahl dengan metode *admiralty* adalah 0.389 dan Bilangan Formzahl dengan metode *least square* adalah 0.415 yang menunjukkan bahwa tipe pasang surut di wilayah Benoa termasuk tipe campuran condong semi-diurnal, dengan dua pasang dan dua surut setiap hari dengan amplitudo yang berbeda.

Analisis datum vertikal pasut menggunakan metode *admiralty* menghasilkan estimasi nilai *Mean Sea Level* (MSL) yaitu 246.198 cm, *Mean High Water Level* (MHWL) yaitu 267.6 cm, *Mean Low Water Level* (MLWL) yaitu 66.1 cm, *Highest High Water Level* (HHWL) 306.8 cm, dan *Lowest Low Water Level* (LLWL) yaitu 26.9 cm. sedangkan dengan metode *least square* didapatkan estimasi datum vertikal dengan nilai *Mean Sea Level* (MSL) yaitu 246.198 cm, *Mean High Water Level* (MHWL) yaitu 252.7 cm, *Mean Low Water Level* (MLWL) yaitu 65.6 cm, *Highest High Water Level* (HHWL) 291.5 cm, dan *Lowest Low Water Level* (LLWL) yaitu 26.8 cm. Nilai-nilai tersebut dapat digunakan sebagai dasar referensi elevasi dalam pemetaan laut dan hidrografi di wilayah Benoa.

5. SARAN

Penelitian selanjutnya diharapkan melibatkan rentang data yang lebih Panjang dan interval pengamatan yang lebih sering, hal ini dinilai dapat memperbanyak jumlah data yang di analisis sehingga dapat mengidentifikasi komponen pasang surut yang lebih banyak juga. Komponen pasang surut yang lebih banyak dinilai dapat memperkecil kesalahan perhitungan prediksi pasang surut di masa mendatang.

Penelitian ini dapat diperluas dengan membandingkan hasil dengan metode analisis harmonik lain atau dengan menambahkan pengaruh angin dan tekanan atmosfer sebagai faktor eksternal yang mempengaruhi pasang surut air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Darwin, G. H. (1883). *The tides and kindred phenomena in the solar system*. London: John Murray.
- Consoli, Sergio & Reforgiato Recupero, Diego & Zavarella, Vanni. (2014). *A survey on tidal analysis and forecasting methods for Tsunami detection*. Science of Tsunami Hazards. 33. 1-56.
- Djunarsjah, E. (2005). *Ilmu Ukur Hidrografi*. Jakarta: Penerbit ITB.
- Doodson, A. T. (1921). *The harmonic development of the tide-generating potential*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 100(704), 305–329. <https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0088>
- Foreman, M. G. G. (1977). *Manual for tidal heights analysis and prediction*. Pacific Marine Science Report, Institute of Ocean Sciences, British Columbia.
- Foreman, M. G. G., & Henry, R. F. (1989). *The harmonic analysis of tidal model time series*. *Advances in Water Resources*, 12(3), 109–120. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(89\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0309-1708(89)90017-1)
- Ulum, M., & Khomsin. (2013), Perbandingan Akurasi Prediksi Pasang Surut Antara Metode *admiralty* dan Metode *least square*, Surabaya, Institut teknologi sepuluh November.

- NOAA. (2000). *Tide and Current Glossary*. National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929–937.
- Emery, W. J., & Thomson, R. E. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier.
- Sasongko, A. K. (2006). Studi pembuatan software hitungan pasang surut dengan metode *admiralty*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.