

TUGAS AKHIR - CM234835

ANALISIS SPASIAL VARIABILITAS TIPE PASANG SURUT DI SELAT MADURA BAGIAN BARAT DENGAN MENGGUNAKAN PEMODELAN HIDRODINAMIKA

MUHAMMAD FARHAN

NRP 5016211060

Dosen Pembimbing

Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 1980050720031121001

Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.

NIP 199508282024061001

Program Studi S-1 Teknik Geomatika

Departemen Teknik Geomatika

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026



TUGAS AKHIR - CM234835

ANALISIS SPASIAL VARIABILITAS TIPE PASANG SURUT DI SELAT MADURA BAGIAN BARAT DENGAN MENGUNAKAN PEMODELAN HIDRODINAMIKA

MUHAMMAD FARHAN

NRP 5016211060

Dosen Pembimbing

Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 1980050720031121001

Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.

NIP 199508282024061001

Program Studi S-1 Teknik Geomatika

Departemen Teknik Geomatika

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan Kependidikan dan Kebumihutan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026



FINAL PROJECT - CM234835

SPATIAL ANALYSIS OF TIDAL TYPE VARIABILITY IN THE WESTERN MADURA STRAIT USING HYDRODYNAMIC MODELING

MUHAMMAD FARHAN

NRP 5016211060

Advisor

Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 1980050720031121001

Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.

NIP 199508282024061001

Study Program Geomatics Engineering

Department of Geomatics Engineering

Faculty of Civil, Planning, and Geo-Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS SPASIAL VARIABILITAS TIPE PASANG SURUT DI SELAT MADURA BAGIAN BARAT DENGAN MENGGUNAKAN PEMODELAN HIDRODINAMIKA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : MUHAMMAD FARHAN

NRP. 5026211060

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1980050720031121001

Pembimbing

2. Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Pembimbing

3. Dr. Khomsin, S.T., M.T
NIP. 197507052000121001

Penguji

4. Dr. Muhammad Aldila Syariz, S.T., M.S., Ph.D.
NIP. 2022199211023

Penguji

5. Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Penguji



SURABAYA

Juli, 2026

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

APPROVAL SHEET

SPATIAL ANALYSIS OF TIDAL TYPE VARIABILITY IN THE WESTERN MADURA STRAIT USING HYDRODYNAMIC MODELING

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements for
obtaining a Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Geomatics Engineering
Departement of Geomatics Engineering
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **MUHAMMAD FARHAN**

NRP. 5016211060

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1980050720031121001

Advisor



2. Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Advisor



3. Dr. Khomsin, S.T., M.T.
NIP. 197507052000121001

Examiner



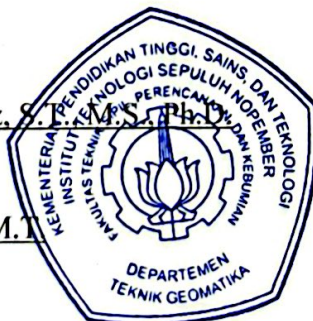
4. Dr. Muhammad Aldila Syariz, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 2022199211023

Examiner



5. Irena Hana Hariyanto, S.T., M.T.
NIP. 2022199812024

Examiner



SURABAYA

July, 2026

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Farhan/5016211060
Program studi : Teknik Geomatika
Dosen Pembimbing / NIP : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D./
1980050720031121001
Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T./
199508282024061001

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul “Analisis Spasial Variabilitas Tipe Pasang Surut Selat Madura Bagian Barat Menggunakan Pemodelan Hidrodinamika” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 Juli 2026

Mengetahui
Dosen Pembimbing I



Danar Guruh Pratomo, S.T.,
M.T., Ph.D.
NIP. 1980050720031121001

Mengetahui
Dosen Pembimbing II



Candida Aulia De Silva
Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Mahasiswa



Muhammad Farhan
NRP. 5016211060

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

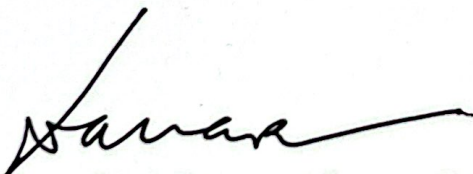
Student Name / NRP : Muhammad Farhan / 5016211060
Departement : Teknik Geomatika
Advisor / NIP : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D. /
1980050720031121001
Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T. /
199508282024061001

Hereby declare that the Final Project with the title of "Spatial Analysis of Tidal Type Variability in The Western Madura Strail Using Hydrodynamic Modeling" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientic writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 July 2026

Acknowledged
Advisor



Danar Guruh Pratomo, S.T.,
M.T., Ph.D.
NIP. 1980050720031121001

Acknowledged
Advisor



Candida Aulia De Silva
Nusantara, S.T., M.T.
NIP. 199508282024061001

Student



Muhammad Farhan
NRP. 5016211060

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

ANALISIS SPASIAL VARIABILITAS TIPE PASANG SURUT DI SELAT MADURA BAGIAN BARAT DENGAN MENGGUNAKAN PEMODELAN HIDRODINAMIKA

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Farhan/5016211060
Departemen : Teknik Geomatika FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D
Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T

Abstrak

Pasang surut air laut dipengaruhi oleh gaya gravitasi Bulan dan Matahari serta kondisi morfologi perairan, seperti kedalaman dan penyempitan selat, yang dapat menyebabkan variasi spasial karakteristik dan tipe pasang surut. Selat Madura bagian barat memiliki morfologi yang kompleks sehingga berpotensi menimbulkan perbedaan tipe pasang surut secara spasial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variabilitas spasial tipe pasang surut di wilayah tersebut melalui pemodelan hidrodinamika. Pemodelan dilakukan menggunakan Delft3D dengan resolusi grid 200×200 meter selama satu tahun, menggunakan data batimetri GEBCO, data angin ECMWF, serta konstanta pasang surut dari model TPXO. Hasil pemodelan divalidasi menggunakan data pengamatan pasang surut dari stasiun Badan Informasi Geospasial (BIG) Surabaya dan menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,18 m yang menunjukkan kinerja model yang baik. Hasil model selanjutnya dianalisis secara harmonik menggunakan program T-Tide untuk memperoleh amplitudo dan fase konstanta pasang surut utama (M2, S2, K1, dan O1), yang kemudian digunakan untuk menyusun peta *co-range* dan peta tipe pasang surut berdasarkan nilai Formzahl. Hasil analisis menunjukkan bahwa amplitudo K1 berkisar 0,4–0,5 m, O1 sebesar 0,2–0,3 m, M2 sebesar 0,25–0,50 m, dan S2 sebesar 0–0,40 m. Pola perambatan fase menunjukkan bahwa konstanta diurnal (K1 dan O1) berasal dari dua arah, yaitu Selat Madura bagian timur dan Laut Jawa, sedangkan konstanta semidiurnal (M2 dan S2) merambat dari timur ke barat. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa wilayah penelitian didominasi oleh tipe pasang surut campuran dengan kecenderungan dominasi diurnal dan semidiurnal dengan rentang nilai Formzahl 0,75 sampai 2,25.

Kata kunci: *Co-Tidal Chart, Pasang Surut Air Laut, Pemodelan Hidrodinamika, Selat Madura, Tipe Pasang Surut Air Laut*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRACT

SPATIAL ANALYSIS OF TIDAL TYPE VARIABILITY IN THE WESTERN MADURA STRAIT USING HYDRODYNAMIC MODELING

Student Name / NRP : Muhammad Farhan /5016211060
Department : Teknik Geomatika FTSPK - ITS
Advisor : Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D
Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T

Abstract

Tides are influenced by the gravitational forces of the Moon and the Sun as well as the morphological characteristics of coastal waters, such as depth and channel constriction, which can lead to spatial variations in tidal characteristics and types. The western part of the Madura Strait has a complex morphology that potentially results in spatial differences in tidal types. This study aims to analyze the spatial variability of tidal types in the region through hydrodynamic modeling. The simulation was conducted using Delft3D with a grid resolution of 200×200 meters over a one-year period, utilizing GEBCO bathymetric data, ECMWF wind data, and tidal constituents from the TPXO model. The model results were validated using observed tidal data from the Geospatial Information Agency (BIG) station in Surabaya, yielding a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.18 m, indicating good model performance. The model outputs were further analyzed using harmonic analysis with the T-Tide program to obtain the amplitudes and phases of the main tidal constituents (M2, S2, K1, and O1), which were then used to construct co-range maps and tidal type maps based on Formzahl values. The results show that the amplitude of K1 ranges from 0.4 to 0.5 m, O1 from 0.2 to 0.3 m, M2 from 0.25 to 0.50 m, and S2 from 0 to 0.40 m. Phase propagation patterns indicate that diurnal constituents (K1 and O1) originate from two directions, namely the eastern Madura Strait and the Java Sea, while semidiurnal constituents (M2 and S2) propagate from east to west. Spatial mapping results indicate that the study area is dominated by mixed tidal types with both diurnal and semidiurnal dominance, with formzahl values ranging from 0.75 to 2.25.

Keywords: *Co-Tidal Chart, Hydrodynamic Modeling, Madura Strait, Sea Tides, Tidal Regime*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan keberkahan yang senantiasa dilimpahkan oleh-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Spasial Variabilitas Tipe Pasang Surut di Selat Madura Bagian Barat Dengan Menggunakan Pemodelan Hidrodinamika” dengan penuh kesabaran. Buku tugas akhir ini disusun sebagai syarat tugas akhir bagi setiap mahasiswa Teknik Geomatika ITS dan juga sebagai sebuah bukti bahwa mahasiswa telah mampu menyelesaikan tugas akhir dengan baik dan benar.

Dalam menyelesaikan penyusunan buku tugas akhir ini banyak pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis, diantaranya:

1. Keluarga penulis, Ibu, Bapak dan Kakak yang telah memberikan kasih doa, semangat, dan memberikan seluruh dukungan terkait segala keputusan dan hal yang penulis jalani.
2. Bapak Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D dan Candida Aulia De Silva Nusantara, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberi bimbingan, nasihat, petunjuk, dan arahan selama pelaksanaan penelitian hingga penulis dapat menyelesaikan buku Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya.
3. Segenap dosen Laboratorium Geomarine yang selalu memberi dukungan baik secara keilmuan maupun secara moral.
4. Segenap dosen Teknik Geomatika lainnya, tenaga kependidikan, serta karyawan Departemen Teknik Geomatika ITS yang telah memberikan banyak ilmu, saran, bantuan, dukungan, serta keramahan selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir di Departemen Teknik Geomatika ITS.
5. Laboratorium Geomarine, atas fasilitas, sarana, serta lingkungan yang kondusif untuk berdiskusi dan belajar, serta tidak lupa terimakasih kepada teman-teman penghuni Laboratorium atas kebersamaan, diskusi, begadang, dan dukungan yang telah diberikan selama proses penelitian Tugas Akhir ini.
6. Seluruh teman-teman Departemen Teknik Geomatika FTSPK-ITS Angkatan 2021, atas bantuan, kebersamaan, dukungan, serta semangat yang senantiasa menguatkan di setiap langkah perjalanan ini. Terima kasih telah menjadi bagian dari proses belajar, tumbuh, dan berbagi suka duka selama masa perkuliahan hingga Tugas Akhir ini selesai.
7. Seluruh Mahasiswa Teknik Geomatika ITS yang telah memberi ruang untuk berkembang bersama menjadi lebih baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan ini tidak terlepas dari kekurangan. Akhir kata, penulis berharap semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 20 Juli 2026

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	5
2.2 Selat Madura.....	6
2.3 Bathimetri.....	7
2.4 Pasang Surut Air Laut	8
2.5 Gaya Pembangkit Pasang Surut Air Laut	13
2.6 Pengaruh Meterologis Terhadap Pasang Surut Air Laut.....	15
2.7 Metode Pengukuran Pasang Surut Air Laut	15
2.7.1 <i>Tide Gauge</i>	15
2.7.2 Altimetri.....	16
2.8 Pemodelan Hidrodinamika	16
2.9 Peta Pasang Surut	18
2.9.1 <i>Peta Co-Amplitude</i>	18
2.9.2 <i>Peta Co-Phase</i>	20
2.10 <i>Mean Root Square Error (RMSE)</i>	21
2.11 Perangkat Lunak Delft3D	21

2.12	Program <i>T-Tide</i>	23
BAB 3	METODOLOGI.....	25
3.1	Metode Penelitian	25
3.2	Bahan dan peralatan yang digunakan	26
3.3	Urutan Pelaksanaan Penelitian	26
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1	Hasil Model Hidrodinamika	45
4.2	Ekstrak Nilai Pasang Surut Dari Model.....	51
4.3	Peta <i>Co-Tidal-Chart</i>	55
4.3.1	Peta <i>Co-Range</i> K1.....	55
4.3.2	Peta <i>Co-Range</i> O1.....	57
4.3.3	Peta <i>Co-Amplitudo</i> M2.....	58
4.3.4	Peta <i>Co-Amplitudo</i> S2.....	59
4.4	Peta Tipe Pasang Surut	61
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1	Kesimpulan.....	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN		69
BIODATA PENULIS		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gambar Area Selat Madura	6
Gambar 2.2 Keadaan pasang surut Selat Madura pada satu titik di Muara Poron.....	7
Gambar 2.3 Ilustrasi pasang surut tipe semidiurnal	12
Gambar 2.4 Ilustrasi pasang surut tipe campuran dominan semidiurnal.....	12
Gambar 2.5 Ilustrasi pasang surut diurnal.	13
Gambar 2.6 Pergerakan air laut akibat gaya gravitasi bulan dan matahari.....	14
Gambar 2.7 Stasiun Pasang Surut Konvensional	16
Gambar 2.8 Contoh Peta Co-Amplitude.....	19
Gambar 2.9 Contoh peta co-phase M2	21
Gambar 3.1 Area Penelitian	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan model hidrodinamika	29
Gambar 3.4 Grid pada domain model hidrodinamika.	30
Gambar 3.5 Data kedalaman Gebco08 pada area penelitian.	31
Gambar 3.6 Hasil meshing data kedalam ke dalam grid	32
Gambar 3.7 Letak <i>thins</i> pada area penelitian	33
Gambar 3.8 Sebaran titik <i>observation point</i> pada grid model.	35
Gambar 3.9 <i>Wind Rose</i> kondisi angin Selat Madura Bagian Barat.....	38
Gambar 3.10 Sebaran titik <i>observation point</i> pada grid model.	39
Gambar 3.11 Grafik data pasang surut stasiun Tanjung Perak 2024	42
Gambar 4.1 Beberapa visualisasi hasil model hidrodinamika pasang surut.	45
Gambar 4.2 Grafik data pasang surut model pada grid 206x256 sebagai data validasi	47
Gambar 4.3 Grafik perbandingan antara data model dan stasiun observasi	49
Gambar 4.4 Visualisasi perbandingan antara pasang surut model dengan pengamatan ...	50
Gambar 4.5 Peta co-range K1.	56
Gambar 4.6 Peta co-amplitudo O1	57
Gambar 4.7 Peta co-range M2	59
Gambar 4.8 Peta co-amplitudo S2.....	60
Gambar 4.9 Peta Sebaran Nilai Fromzhal	62
Gambar 4.10 Peta tipe pasang surut Selat Madura Bagian Barat.....	63

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.....	5
Tabel 2.2 Periode dan kecepatan sudut komponen harmonik pasang surut	9
Tabel 2.3 Fenomena penyebab pasang surut air laut setiap konstanta harmonik	9
Tabel 2.4 Tipe pasang surut berdasarkan nilai fromzhal	11
Tabel 3.1 Data yang digunakan untuk membangun model hidrodinamika.	26
Tabel 3.2 Komponen pada grid penelitian.....	30
Tabel 3.3 Time frame pemodelan hidrodinamika	33
Tabel 3.4 Parameter pemodelan hidrodinamika Delft3D	34
Tabel 3.5 Pengaturan <i>flow condition</i>	35
Tabel 3.6 Tabel contoh data <i>input</i> astronomic pada titik North01A	36
Tabel 3.7 Konstanta pemodelan hidrodinamika Delft3D	37
Tabel 3.8 Pengaturan <i>roughness</i> pemodelan hidrodinamika Delft3D.....	37
Tabel 3.9 Pengaturan pada <i>Addition Parameter</i>	38
Tabel 3.10 Pengaturan <i>Store Map Results</i>	40
Tabel 3.11 Pengaturan <i>Store Communication File</i>	40
Tabel 3.12 Klasifikasi tingkat kesalahan RMSE.....	42
Tabel 4.1 Data hasil model berupa data time series water level setiap titik	51
Tabel 4.2 Amplitudo kostanta harmonik pasang surut hasil pengolahan	52
Tabel 4.3 Data fase kostanta harmonik pasang surut hasil pengolahan	53
Tabel 4.4 Data fase dalam jam kostanta harmonik pasang surut	54
Tabel 4.5 Nilai fromzhal setiap titik.	54

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dasarnya pasang surut air laut dipengaruhi oleh faktor astronomis melalui gaya penggerak utama air laut yaitu pengaruh gaya tarik akibat gravitasi bulan dan matahari. Pergerakan air laut oleh gaya tersebut mengakibatkan air akan berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain sesuai dengan waktu rotasi bulan dan matahari (Khalid dkk., 2022). Selama perpindahan tersebut mengakibatkan air terbawa dalam bentuk gelombang dan arus sehingga dalam hal itu pasang surut air laut juga akan dipengaruhi oleh kondisi non astronomis dari suatu perairan seperti kondisi morfologis dasar laut dan akibat penyempitan laut oleh daratan. Perubahan morfologi perairan seperti kedalaman dan penyempitan selat mempengaruhi perambatan gelombang pasang surut air laut (Sugito dkk., 2018).

Selat Madura khususnya bagian barat merupakan suatu sistem perairan yang memiliki karakter morfologi kompleks, ditandai oleh variasi kedalaman, penyempitan alur, serta konfigurasi garis pantai yang heterogen. Berdasarkan data bathimetri Gebco kedalam dari Laut Jawa yang luas berkisar antara 70-90 meter menuju ke dalam Selat Madura bagian barat yang menyempit dengan lebar dua kilometer mengalami perubahan kedalaman menjadi 25-10 meter (Hidayah dan Wiyanto, 2021). Kondisi geomorfik seperti ini secara langsung memengaruhi pola perambatan gelombang pasang surut, karena energi pasang surut yang masuk dari laut terbuka akan mengalami perubahan fase, amplitudo, serta pola interferensi ketika berinteraksi dengan topografi dasar laut dan bentuk perairan (Zhang dkk., 2020). Fenomena tersebut memungkinkan respons pasang surut pada setiap lokasi di dalam selat tidak bersifat homogen, sehingga tipe pasang surut berpotensi berbeda secara spasial bergantung pada dominasi komponen harmonik yang terbentuk akibat interaksi antara *forcing* astronomi dan karakter fisik perairan (Pugh & Woodworth, 2014). Oleh karena itu, analisis spasial tipe pasang surut diperlukan untuk memahami bagaimana morfologi lokal mengendalikan dinamika pasang surut dalam skala ruang yang lebih rinci.

Pentingnya penelitian tentang pasang surut di Selat Madura khususnya bagian barat dikarenakan Selat Madura bagian barat merupakan kawasan strategis yang berperan sebagai salah satu inti kegiatan perekonomian Indonesia. Wilayah ini berfungsi sebagai koridor maritim utama yang mendukung aktivitas pelayaran, bongkar muat barang, perikanan, serta kegiatan industri dan logistik, ditandai dengan keberadaan pelabuhan besar seperti Pelabuhan Tanjung Perak dan sejumlah pelabuhan pendukung, baik pelabuhan publik maupun pelabuhan privat. Tercatat berdasarkan data Badan Pusat Statistika untuk untuk pelayaran antarpulau khusus pelabuhan Tanjung Perak selama 2024 memiliki berat bongkar dan muat barang sebanyak 14 juta ton. Selain itu secara keseluruhan berdasarkan data dari 2008-2013 rata rata pertahun kapal yang melakukan aktivitas dikawasan Selat Madura sebanyak 20.582 kapal baik nasional maupun internasional (Sumarsono dkk., 2018). Intensitas aktivitas maritim yang tinggi di kawasan ini menuntut ketersediaan informasi pasang surut yang akurat dan representatif secara spasial, terutama untuk mendukung keselamatan navigasi, perencanaan waktu sandar kapal, serta pelaksanaan kegiatan survei hidrografi seperti pengukuran dan inspeksi kedalaman perairan yang sangat bergantung pada koreksi pasang surut.

Namun untuk mengetahui keadaan pasang surut air laut secara menyeluruh di dalam suatu perairan membutuh data yang tidak hanya berada di area pinggir tapi secara menyeluruh. Khususnya Selat Madura hanya ada dua stasiun perekaman pasang surut air laut yaitu stasiun

milik Badan Informasi Geospasial (BIG) dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Hal tersebut memunculkan dua solusi yaitu menggunakan data dari satelit altimetri dan melalui pemodelan hidrodinamika. Pada dasarnya data satelit altimetri tidak memiliki resolusi yang baik untuk area dangkal dan berdekatan dengan daratan sehingga untuk kasus Selat Madura bagian barat yang hanya memiliki kondisi sedemikian rupa tidak lebih baik untuk menggunakan data satelit altimetri (Maya dkk., 2019). Solusinya menggunakan data pemodelan hidrodinamika.

Pemodelan hidrodinamika memungkinkan untuk mendapatkan data *time series* pasang surut air laut secara menyeluruh untuk area Selat Madura bagian barat dengan hanya menggunakan satu titik validasi. Model hidrodinamika merupakan pemodelan numerik untuk memodelkan suatu keadaan air dari waktu ke waktu dalam suatu wilayah memungkinkan untuk mendapatkan data yang luas dengan melakukan generalisasi dengan sedikit data yang tersedia (Nusratina dkk., 2023). Sehingga pada penelitian ini menggunakan pemodelan hidrodinamika untuk mengetahui karakteristik khususnya variabilitas tipe pasang surut Selat Madura bagian barat.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini yang menjadi rumusan masalah yaitu sebagai berikut.

1. Bagaimana tingkat akurasi hasil pemodelan hidrodinamika pasang surut Selat Madura bagian barat yang hanya menggunakan dua parameter yaitu parameter angin dan konstanta pasang surut model terhadap data hasil pengamatan langsung pasang surut stasiun Tanjung Perak Surabaya.
2. Bagaimana karakteristik pasang surut perairan Selat Madura bagian barat berdasarkan peta *co-range* dengan data hasil pemodelan hidrodinamika?
3. Bagaimana sebaran jenis pasang surut Selat Madura bagian barat berdasarkan peta tipe pasang surut?

1.3 Batasan Masalah

Untuk batasan masalah pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Peta pasang surut hanya akan berfokus pada empat komponen utama harmonik pasang surut yaitu komponen M2, S2, K1 dan O1 sesuai dengan persamaan fromzhal.
2. Pada pemodelan hidrodinamika hanya akan mengambil seluruh area Selat Madura bagian barat dengan sebagian kecil Laut Jawa yang berhubungan dengan Selat Madura sesuai dengan koordinat $6^{\circ}31'42.45''\text{LS}$ - $7^{\circ}54'5.90''\text{LS}$ dan $112^{\circ}13'53.89''\text{BT}$ - $113^{\circ}10'21.29''\text{BT}$.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini pada Selat Madura bagian barat menggunakan pemodelan hidrodinamika ini yaitu sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui tingkat akurasi hasil pemodelan hidrodinamika pasang surut Selat Madura bagian barat yang hanya menggunakan dua parameter angin dan pasang surut terhadap data hasil pengamatan pasang surut stasiun Tanjung Perak Surabaya.
2. Untuk mengetahui karakteristik pasang surut perairan Selat Madura bagian barat berdasarkan peta *co-range* dengan data hasil pemodelan hidrodinamika.
3. Untuk mengetahui sebaran jenis pasang surut Selat Madura bagian barat berdasarkan peta tipe pasang surut.

1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini yaitu mengetahui secara lebih detail tentang perbedaan tipe pasang surut air laut dan karakteristik pasang surut air laut pada bagian barat Selat Madura sehingga dapat digunakan sebagai bahan keilmuan pada bidang oseanografi dan hidrografi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang pasang surut yang kami lakukan mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya yang terkait. Terdapat tiga penelitian sebelumnya yang menggunakan metode atau studi kasus yang berbeda yang dijabarkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.

Sumber	Penjelasan
Putra, 2017	Pada penelitian ini dilakukan pembuatan peta pasang surut menggunakan data dari beberapa stasiun pasang surut di pantai Laut Jawa termasuk Selat Madura. Metode penentuan nilai harmonik pasang surut dengan melakukan perhitungan konstanta harmonik terhadap 20 stasiun pasang surut yang tersebar di seluruh pesisir Laut Jawa sehingga didapatkan data fase dan amplitudo dari masing masing konstanta harmonik. Data tersebut selanjutnya diinterpolasi menggunakan perangkat ArcGIS (Putra, 2017).
Zhang dkk., 2020	Penelitian oleh Zhang dkk., (2020) mengkaji dinamika sistem arus pasang surut di Laut Kuning bagian selatan dengan menekankan peran interaksi antara geometri cekungan, batimetri, dan kondisi batas terbuka terhadap pola perambatan gelombang dan arus pasang surut. Penelitian ini menggunakan pemodelan hidrodinamika teridealisasi berbasis Delft3D-flow untuk menganalisis struktur sistem pasang surut melalui kombinasi peta <i>co-tidal</i> , <i>co-current</i> , <i>co-inclination</i> , serta elips arus, sehingga mampu mengidentifikasi keberadaan <i>current amphidromic points (CAPs)</i> dan fenomena <i>radial tidal current</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan <i>Poincaré modes</i> dan perbedaan fase lateral akibat variasi kedalaman merupakan faktor kunci dalam pembentukan pola arus pasang surut yang kompleks, sementara perubahan skala dan geometri cekungan secara signifikan memengaruhi distribusi CAPs dan karakter perambatan pasang surut. Meskipun memberikan pemahaman mendalam tentang dinamika pasang surut di laut marginal berskala besar, penelitian ini masih terbatas pada wilayah perairan terbuka dengan dimensi cekungan luas, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk menerapkan pendekatan serupa pada perairan sempit dan dangkal, seperti selat, guna mengkaji variabilitas spasial tipe pasang surut yang dipengaruhi oleh morfologi lokal.
Lukman dkk., 2025	Penelitian ini mengkaji karakteristik dan pola perambatan pasang surut di perairan Indonesia bagian barat melalui penyusunan peta <i>co-tidal chart</i> berbasis data model pasang surut global FES2014, dengan mempertimbangkan kompleksitas oseanografi wilayah yang dipengaruhi secara simultan oleh Samudera Hindia dan Samudera Pasifik serta posisinya sebagai jalur strategis pelayaran internasional (ALKI I dan II). Penelitian tersebut menggunakan konstanta harmonik pasang surut periode 1999–2014 dengan resolusi spasial $1/16^\circ$ dan mengolah sembilan komponen utama (K1, O1, P1, K2, M2, S2, N2, M4, dan MS4) melalui konversi fase menjadi waktu air tinggi dan pemetaan <i>co-tidal</i> menggunakan perangkat lunak GIS

	dengan metode interpolasi <i>Natural Neighbor</i>. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen harian tunggal (K1, O1, P1) dominan merambat dari Samudera Pasifik, sedangkan komponen harian ganda (K2, M2, S2, N2) berasal dari Samudera Hindia, sementara komponen perairan dangkal (M4 dan MS4) berkembang secara lokal di wilayah pesisir dan perairan dangkal, sejalan dengan teori pasang surut klasik. Meskipun memiliki keunggulan pada cakupan spasial yang luas dan visualisasi <i>co-tidal chart</i> yang detail, penelitian ini masih bersifat deskriptif dan belum mengaitkan variasi pasang surut secara kuantitatif dengan faktor morfologi perairan, sehingga membuka peluang penelitian lanjutan yang mengintegrasikan pemodelan hidrodinamika atau data observasi untuk memperdalam pemahaman dinamika pasang surut regional.
--	--

2.2 Selat Madura

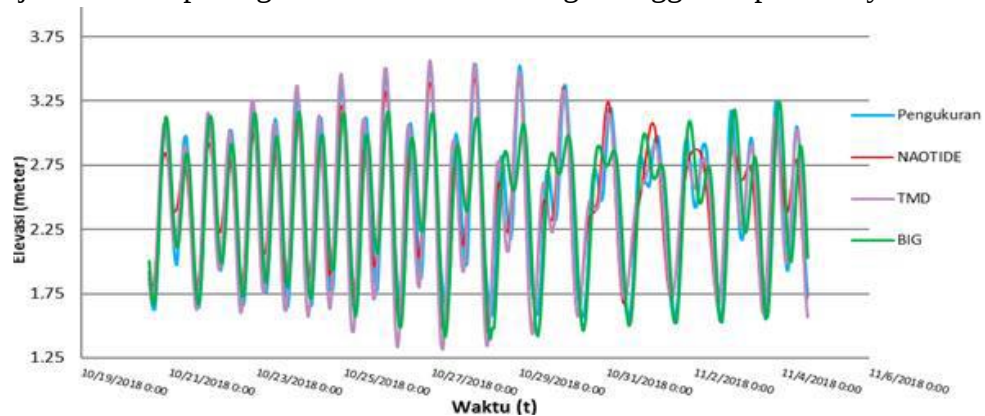
Selat Madura merupakan perairan sempit yang memisahkan Pulau Jawa dan Pulau Madura di Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Selat ini menghubungkan Laut Jawa dengan perairan di bagian timur Indonesia sehingga memiliki peran strategis sebagai jalur transportasi laut, kawasan pelabuhan, serta pusat aktivitas ekonomi dan industri. Keberadaan pelabuhan utama seperti Pelabuhan Tanjung Perak menjadikan Selat Madura sebagai salah satu kawasan perairan dengan intensitas pelayaran yang tinggi, sehingga pemahaman karakteristik oseanografinya menjadi sangat penting (Dumatubun dkk., 2024).



Gambar 2.1 Gambar Area Selat Madura

Dari sudut pandang oseanografi fisik, Selat Madura seperti pada Gambar 2.1 memiliki morfologi perairan yang kompleks, ditandai oleh variasi kedalaman, penyempitan selat, serta konfigurasi garis pantai yang tidak seragam. Kedalaman perairan umumnya relatif dangkal hingga menengah, dengan gradasi kedalaman yang meningkat ke arah laut terbuka. Kondisi morfologi ini berpengaruh signifikan terhadap dinamika hidrodinamika, khususnya arus laut dan propagasi gelombang pasang surut. Pada perairan sempit dan dangkal, gelombang pasang surut cenderung mengalami amplifikasi akibat efek gesekan dasar, refleksi gelombang, serta interaksi dengan batas pantai. Untuk pergerakan arusnya sendiri terbagi atas dua sistem arus yaitu pada sistem arus angin barat dan sistem arus angin timur. Arus Selat Madura pada musim barat bergerak dari arah Barat menuju Tenggara, pada bulan Desember kecepatan arus Selat Madura bagian dalam memiliki rata-rata $0,08 \pm 0,03$ m/s lalu daerah Utara Pulau Madura dengan rata-rata kecepatan $0,43 \pm 0,1$ m/s. Sedangkan untuk musim timur arus bergerak dari arah bagian Utara Pulau Madura berbalik arah menuju Barat (Dumatubun dkk., 2024).

Pada penelitian terdahulu pada salah satu titik di muara sungai porong selat madura didapatkan tipe pasang surut perairan muara Porong adalah campuran condong ke harian ganda (Mixed Tide, Prevailing Semi Diurnal) dengan nilai Formzahl 0,78, yang berarti dalam satu hari akan terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi dan periodenya berbeda.



Gambar 2.2 Keadaan pasang surut Selat Madura pada satu titik di Muara Porong (Sufyan dkk., 2023).

Hal tersebut didapatkan dari data pengukuran, NAOTIDE, TMD, dan data pasang surut BIG dengan grafik seperti pada Gambar 2.2. Berdasarkan ketiga model dan pengukuran, secara visual menunjukkan kemiripan untuk pola dan nilainya yang menunjukkan tipe pasang surut yang sama (Sufyan dkk., 2023).

2.3 Bathimetri

Bathimetri merupakan cabang ilmu oseanografi dan geomatika yang mempelajari pengukuran dan pemetaan kedalaman perairan serta bentuk topografi dasar laut, danau, maupun sungai. Secara konsep, bathimetri dapat dianggap sebagai analogi topografi daratan, di mana elevasi permukaan bumi digantikan oleh kedalaman dasar perairan relatif terhadap suatu datum vertikal tertentu, seperti *Mean Sea Level (MSL)* atau *Lowest Astronomical Tide (LAT)*. Informasi bathimetri sangat penting dalam berbagai bidang, antara lain navigasi pelayaran, perencanaan pelabuhan, pemodelan hidrodinamika, studi pasang surut, mitigasi bencana pesisir, serta eksplorasi sumber daya laut.

Pengukuran bathimetri umumnya dilakukan menggunakan metode akustik, yaitu dengan memanfaatkan perambatan gelombang suara di dalam air. Prinsip dasarnya adalah pengiriman pulsa suara dari transduser menuju dasar perairan, kemudian menerima kembali gelombang pantul (echo). Namun pada bathimetri global salah satunya, data bathimetri milik GEBCO, bathimetri GEBCO tidak diperoleh melalui satu metode pengukuran langsung, melainkan melalui kompilasi dan integrasi multi-sumber data dalam skala global. Sumber utama data GEBCO meliputi pengukuran kedalaman dari kapal (*shipborne sounding*) yang tersedia secara terbatas, data sonar historis, serta estimasi kedalaman yang diturunkan dari altimetri satelit. Metode altimetri satelit tidak mengukur kedalaman secara langsung, tetapi mengestimasi topografi dasar laut berdasarkan variasi medan gravitasi bumi yang memengaruhi tinggi muka laut (Gebcofoundation, 2021).

Akuisisi data GEBCO bersifat tidak serentak dan heterogen, karena data dikumpulkan dari berbagai waktu, instrumen, dan tingkat ketelitian yang berbeda. Di banyak wilayah laut dalam, terutama yang minim survei kapal, data GEBCO sangat bergantung pada hasil pemodelan dan interpolasi. Di wilayah pesisir dan perairan dangkal, keterbatasan akuisisi data langsung

menyebabkan ketelitian GEBCO cenderung lebih rendah dibandingkan bathimetri hasil survei lapangan. Resolusi data GEBCO berada pada 15 *arc second* (Gebcofoundation, 2021).

2.4 Pasang Surut Air Laut

Fenomena pasang surut air laut merupakan fenomena yang bersumber dari adanya gaya tarik gravitasi serta efek sentrifugal berupa efek dorongan pada arah luar pusat rotasi bumi (Maya dkk., 2019). Pada dasarnya gaya tarik dari gravitasi baik gaya gravitasi yang dihasilkan bulan ataupun matahari sama-sama menghasilkan dua tonjolan (*bulge*) pasang surut gravitisional di laut. Deklasi menentukan lintang tonjolan pasang surut dimana deklasi merupakan sudut sumbu rotasi dengan bidang orbital bulan dan matahari (Priyana, 1994 dalam Maya dkk., 2019).

Selain faktor astronomis terdapat juga faktor non astronomis yang memengaruhi pasang surut air laut. Faktor bentuk garis pantai serta topografi dasar perairan menjadi bagian faktor non astronomis (Supriyadi dkk., 2019). Selain itu kondisi temperatur atmosfer dan angin menjadi faktor non astronomis lainnya yang berpengaruh besar pada keadaan pasang surut atau *sea-level* suatu perairan (Pugh & Woodworth, 2014).

Kedua faktor tersebut menjadi faktor utama dari penyebab perbedaan tipe dari pasang surut perairan. Fenomene pasang surut dibagi atas beberapa tipe pasang surut untuk mendefinisikan keadaan pasang surut suatu perairan. Secara spesifik untuk kawasan perairan Asia Tenggara memiliki tipe pasang surut sebagai berikut :

1. *Diurnal Tide* (pasang surut harian tunggal) yaitu tipe perairan yang mengalami satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari;
2. *Semi Diurnal Tide* (pasang surut harian ganda) yaitu tipe perairan yang mengalami dua kali pasang dan dua kali surut dalam satu hari;
3. *Mixed tide, prevailing diurnal* (pasang surut campuran condong harian tunggal) yaitu tipe perairan dengan pasang surut yang terjadi setiap harinya satu kali pasang dan satu kali surut, tetapi juga dapat terjadi kadang dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi dan periode yang berbeda;
4. *Mixed tide, prevailing semi diurnal* (pasang surut campuran condong harian ganda) yaitu tipe perairan dengan keadaan pasang surut yang lebih sering terjadi dua kali pasang dan dua kali surut tetapi pada periode dan tinggi yang berbeda terkadang juga terjadi satu kali pasang dan satu kali surut (Supriyadi dkk., 2019).

Penentuan tipe pasang surut ditentukan berdasarkan perhitungan nilai konstanta pasang surut yang didapatkan dari hasil pengukuran pasang surut secara langsung atau melalui satelit altimetri yang diolah menggunakan metode tertentu. Setiap konstanta pasang surut memiliki nilai amplitudo dan periode yang berbeda-beda untuk setiap komponen pasang surut. Pada dasarnya konstanta pasang surut tidak terbatas pada 11 konstanta yang dikenal secara umum yaitu sebagai berikut untuk 11 konstanta tersebut.

- a. Konstanta harmonik periode setengah harian (*semidiurnal periode tide*), terdiri dari M_2 , S_2 , N_2 , dan K_2 ;
- b. Konstanta harmonik periode harian (*diurnal periode tide*), terdiri dari K_1 , O_1 dan P_1 ;
- c. Konstanta harmonik periode panjang (*long periode tide*), terdiri dari M_f , dan M_m ;
- d. Konstanta harmonik periode dangkal (*shallow periode tide*), terdiri dari M_4 dan MS_4 (Triatmodjo, 1999 dalam Andrya, 2017). Untuk lebih jelasnya pada Tabel 2.2 penjabaran waktu serta kecepatan sudut masing-masing komponen harmonik pasang surut.

Tabel 2.2 Periode dan kecepatan sudut komponen harmonik pasang surut dalam interval per-jam (Poerbandono dan Djunarsjah, 2005).

Komponen Pasang Surut	Interval pengamatan setiap jam		Kategori
	Periode (jam)	Kecepatan Sudur ($^{\circ}$ /jam)	
M ₂	12,24	28,98	Semidiurnal
S ₂	12,00	30,00	Semidiurnal
N ₂	12,66	28,44	Semidiurnal
K ₂	11,97	20,08	Semidiurnal
K ₁	23,93	15,04	Diurnal
O ₁	25,82	13,94	Diurnal
P ₁	24,06	14,96	Diurnal
M ₄	6,21	57,96	Periode Dangkal
MS ₄	6,10	58,98	Periode Dangkal
S ₄	6,00	60,00	Periode Dangkal

Setiap konstanta memiliki penjelasan masing masing terkait pengaruhnya serta fenomena yang menyebabkan terjadinya pasang surut seperti pada Tabel 2.3. Fenomena penyebab terjadinya pasang surut air laut, utamanya dipengaruhi oleh faktor gaya gravitasi bulan, tetapi beberapa pengaruh lain juga pastinya memengaruhi dari terjadinya pasang surut air laut. Pada dasarnya untuk membangun atau memodelkan pasang surut air laut dapat menggunakan empat komponen utama pasang surut yaitu M_2 , S_2 , O_1 , dan P_1 . Namun untuk lebih detailnya ditambahkan dengan konstanta-konstanta lainnya yang mana menandakan bagaimana pengaruh dari setiap kostanta terhadap terjadinya pasang surut air laut. (Poerbandono dan Djunarsjah 2005).

Tabel 2.3 Fenomena penyebab pasang surut air laut setiap konstanta harmonik pasang surut air laut (Poerbandono dan Djunarsjah, 2005).

Spesies	Simbol	Fenomena
Semi-diurnal	M_2	Gravitasi bulan dengan orbit lingkaran dan sejajar ekuator bumi.
	S_2	Gravitasi matahari dengan orbit lingkaran dan sejajar ekuator bumi.
	N_2	Perubahan jarak bulan dengan bumi akibat lintasan elips.
	K_2	Perubahan jarak bumi dengan matahari akibat lintasan elips.
Diurnal	K_1	Deklinasi sistem bulan dan matahari.
	O_1	Deklinasi bulan.
	P_1	Deklanasi matahari.
Periode anjang	M_f	Variasi setengah bulanan
	M_m	Variasi bulanan
	S_{sa}	Variasi semi tahunan
Periode dangkal	$2SM_2$	Interak bulan dan dan matahari
	MNS_2	Interaksi bulan dan matahari dengan perubahan jarak matahari akibat lintasan berbentuk ellips.
	MK_3	Interaksi bulan dan matahari dengan perubahan jarak bulan akibat lintasan berbentuk ellips.

	M_4	Dua kali kecepatan sudut M_2 kibat pengaruh bulan di perairan dangkal.
	MS_4	Interaksi M_2 dan S_2 di perairan dangkal

Kostanta tersebut dapat ditentukan dengan beberapa metode perhitungan yang secara umum dikenal yaitu menggunakan metode admiralty dan metode *least square*. Penggunaan metode admiralty terbatas hanya pada 15 dan 29 hari sedangkan untuk metode *least square* dapat menggunakan data yang lebih banyak. Penggunaan metode *least square* menerapkan konsep dimana variasi naik turunnya muka air laut adalah hasil penjumlahan (superposisi) dari suatu gelombang komponen harmonik pasang surut di suatu perairan. Sehingga dapat dituliskan tinggi muka air laut tersebut dengan persamaan 2.1 dibawah ini. Persamaan tersebut terdapat

$$H(t)_i = A_o + \sum_1^n A_n \cos[\omega_n t_i - g_n] \quad (2.1)$$

A_o merupakan tinggi muka air laut rata rata (*MSL*) dan A_n merupakan amplitudo konstanta pasut ke-n (*constituent*) yang didefinisikan sebagai persamaan 2.2 berikut.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.2)$$

Pada persamaan 2. a_n dan b_n merupakan jarak konstanta pasang surut ke-n. Selanjutnya pada persamaan ω_n menandakan kecepatan sudut konstanta pasang surut ke-n didefinisikan lagi dengan menggunakan persamaan 2.3 berikut.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{P_n} \quad (2.3)$$

P_n periode pasang surut ke-n. Untuk g_n merupakan fase konstanta pasang surut ke-n yang didefinisikan sebagai persamaan 2.4 berikut.

$$g_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (2.4)$$

Fase tersebut merupakan ditentukan berdasarkan jarak konstanta. Untuk lebih lanjutnya untuk menghitung waktu air tertinggi j_n dalam jam pada area pengamatan menggunakan persamaan 2.5 berikut ini.

$$j_n = \frac{g_n}{\omega_n} \quad (2.5)$$

Berdasarkan dari persamaan 2.1 maka menggunakan persamaan kuadrat terkecil dengan rumus umum yaitu :

$$F = A.X \quad (2.6)$$

sehingga didapatkan persamaan 2.7 berikut ini :

$$\begin{bmatrix} Ht_1 \\ \dots \\ Ht_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\omega_1 t_1) & \sin(\omega_1 t_1) & \dots & \cos(\omega_n t_1) & \sin(\omega_n t_1) \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos(\omega_1 t_i) & \sin(\omega_1 t_i) & \dots & \cos(\omega_n t_i) & \sin(\omega_n t_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_o \\ a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ \dots \\ a_n \\ b_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7 tersebut merupakan persamaan yang dimana setiap komponen matriks tersebut akan dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.8 berikut ini dimana nilai X merupakan nilai hasilnya yang didalamnya terdapat A_o (nilai *Mean Sea Level*).

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot F) \quad (2.8)$$

Pada nilai X akan didapatkan variabel a dan b yang merupakan nilai konstanta pasang surut dari hasil perhitungan menggunakan metode *least square*.

Berdasarkan konstanta konstanta tersebut dapat ditentukan nilai Fromzal dengan persamaan 2.9 berikut ini dimana K1 merupakan nilai amplitudo konstanta harmonik K1, O1 merupakan nilai amplitudo konstanta harmonik O1, M2 merupakan nilai amplitudo konstanta harmonik M2, dan S2 merupakan nilai amplitudo konstanta harmonik S2. Dari nilai yang didapatkan dari persamaan fromzal tersebut akan

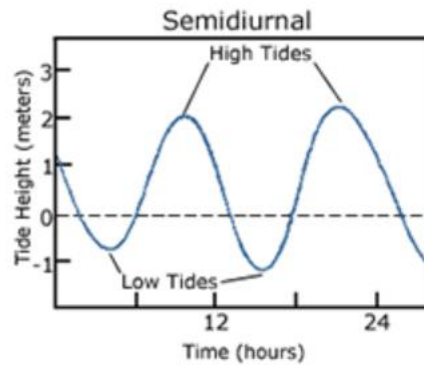
$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (2.9)$$

diklasifikasi menjadi empat nilai berdasarkan tipe pasang surut yang ada pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tipe pasang surut berdasarkan nilai fromzhal (Poerbandono dan Djunarsjah, 2005).

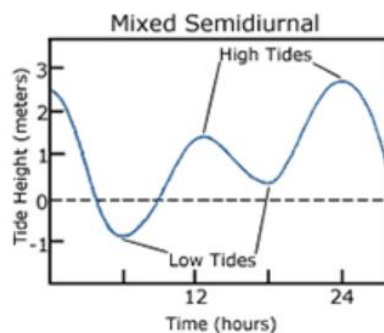
No	Nilai Fromzhal	Tipe Pasang Surut
1	$F \leq 0,25$	<i>Semi diurnal tide</i>
2	$0,25 < F \leq 1,5$	<i>Mixed tide, semi diurnal</i>
3	$1,5 < F \leq 3,0$	<i>Mixed tide, prevailing diurnal</i>
4	$F > 3,0$	<i>Diurnal tide</i>

Pada tipe semidiurnal, dalam satu hari (± 24 jam) terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi pasang dan rendah surut yang relatif sama seperti ilustrasi pada Gambar 2.3. Hal ini menunjukkan bahwa komponen pasang surut semidiurnal (M_2 dan S_2) jauh lebih dominan dibandingkan komponen diurnal. Secara fisik, kondisi ini umumnya dijumpai di perairan terbuka yang relatif dalam dan tidak banyak dipengaruhi oleh penyempitan atau efek morfologi lokal.



Gambar 2.3 Ilustrasi pasang surut tipe semidiurnal (Pugh & Woodworth, 2014).

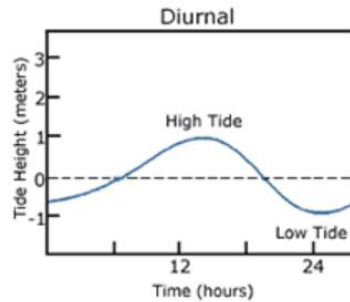
Tipe campuran dominan semidiurnal masih menunjukkan dua kali pasang dan dua kali surut per hari pada Gambar 2.4, tetapi tinggi pasang dan rendah surutnya tidak sama. Ketidaksimetrian ini menandakan bahwa komponen diurnal (K_1 dan O_1) mulai memberikan pengaruh, meskipun komponen semidiurnal masih lebih dominan. Tipe ini umum dijumpai di wilayah transisi antara laut terbuka dan perairan selat.



Gambar 2.4 Ilustrasi pasang surut tipe campuran dominan semidiurnal (Pugh & Woodworth, 2014).

Pada tipe campuran dominan diurnal, dalam satu hari masih dapat terjadi dua kali pasang dan dua kali surut, tetapi salah satu pasang dan salah satu surut jauh lebih dominan. Hal ini mencerminkan bahwa energi pasang surut diurnal lebih besar dibandingkan semidiurnal, meskipun keduanya masih berkontribusi. Kondisi ini sering muncul di perairan selat yang sempit dan dangkal, di mana pengaruh morfologi memperkuat komponen diurnal.

Tipe diurnal ditandai dengan satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari seperti ilustrasi pada Gambar 2.5. Pola ini menunjukkan dominasi kuat komponen diurnal (K_1 dan O_1), sedangkan komponen semidiurnal sangat kecil pengaruhnya. Secara fisik, kondisi ini umumnya berkaitan dengan resonansi lokal, efek gesekan dasar yang kuat, dan konfigurasi morfologi perairan tertutup atau semi-tertutup (Pugh & Woodworth, 2014).



Gambar 2.5 Ilustrasi pasang surut diurnal (Pugh & Woodworth, 2014).

2.5 Gaya Pembangkit Pasang Surut Air Laut

Gaya pembangkit pasang surut adalah gaya-gaya fisika yang menyebabkan terjadinya naik turunnya muka air laut secara periodik di permukaan bumi. Secara umum, pasang surut dibangkitkan oleh interaksi antara gaya tarik gravitasi bulan dan matahari terhadap bumi serta gaya sentrifugal yang timbul akibat sistem rotasi bumi-bulan. Meskipun matahari memiliki massa yang jauh lebih besar dibanding bulan, pengaruh bulan terhadap pasang surut lebih dominan karena jaraknya yang jauh lebih dekat ke bumi (Pugh & Woodworth, 2014).

Teori Pasang Surut Keseimbangan (Equilibrium Tide Theory) merupakan teori dasar yang digunakan untuk menjelaskan pembangkitan pasang surut akibat gaya gravitasi Bulan dan Matahari terhadap Bumi. Teori ini mengasumsikan bahwa permukaan laut selalu berada dalam keadaan setimbang terhadap resultan gaya gravitasi Bumi dan gaya pembangkit pasang surut (tide-generating force). Dengan kata lain, permukaan laut dianggap dapat menyesuaikan diri secara langsung terhadap perubahan potensial gravitasi tanpa mempertimbangkan pengaruh dinamika aliran, gaya gesek, rotasi Bumi, maupun keberadaan benua (Pugh & Woodworth, 2014).

Dalam teori ini, gaya pembangkit pasang surut menyebabkan perubahan kecil pada arah gaya gravitasi efektif sehingga permukaan laut mengalami kemiringan (tilting) mengikuti perubahan potensial pasang surut. Kondisi kesetimbangan tersebut dinyatakan sebagai hubungan antara elevasi muka air laut dan potensial pembangkit pasang surut, di mana jumlah energi potensial gravitasi dan potensial pasang surut tetap konstan pada seluruh permukaan laut. Persamaan ini menjadi dasar dalam menentukan elevasi teoritis muka air laut akibat pengaruh gravitasi benda langit (Pugh & Woodworth, 2014).

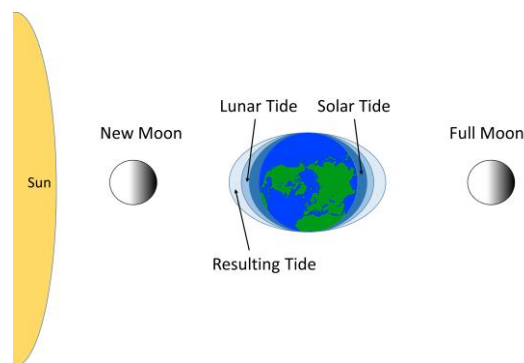
Berdasarkan teori keseimbangan, elevasi pasang surut dapat diuraikan menjadi tiga kelompok utama konstituen harmonik, yaitu pasang surut periode panjang (long-period tides), pasang surut diurnal, dan pasang surut semidiurnal. Konstituen periode panjang dipengaruhi oleh perubahan deklinasi Bulan dan memiliki amplitudo terbesar di wilayah kutub serta mengecil hingga mendekati nol pada lintang sekitar 35° . Konstituen diurnal memiliki satu siklus dalam satu hari dan mencapai amplitudo maksimum pada lintang sekitar 45° , sedangkan amplitudonya menjadi nol di ekuator dan kutub. Sementara itu, konstituen semidiurnal memiliki dua siklus dalam satu hari dengan amplitudo maksimum di wilayah ekuator dan berkurang hingga nol di daerah kutub (Pugh & Woodworth, 2014).

Besarnya amplitudo pasang surut keseimbangan dipengaruhi oleh jarak antara Bumi dan Bulan yang berubah secara periodik. Secara teoritis, amplitudo pasang surut berbanding terbalik dengan pangkat tiga jarak Bumi–Bulan, sehingga perubahan jarak Bulan akan menyebabkan variasi kekuatan gaya pembangkit pasang surut. Selain itu, kontribusi gaya gravitasi Matahari terhadap pasang surut memiliki karakteristik yang serupa dengan pengaruh Bulan, tetapi

amplitudonya lebih kecil, yaitu sekitar 46% dari amplitudo pasang surut yang dibangkitkan oleh Bulan (Pugh & Woodworth, 2014).

Meskipun teori kesetimbangan hanya menghasilkan amplitudo pasang surut sekitar 0,27 m untuk komponen semidiurnal di wilayah ekuator, kondisi tersebut berbeda dengan pengamatan di lautan yang umumnya menunjukkan amplitudo lebih besar. Perbedaan ini terjadi karena teori kesetimbangan tidak memperhitungkan respons dinamis lautan, seperti pengaruh rotasi Bumi (gaya Coriolis), kedalaman perairan, bentuk cekungan laut, gesekan dasar, serta interaksi gelombang dengan garis pantai. Faktor-faktor tersebut menyebabkan terjadinya penguatan maupun pelemahan amplitudo pasang surut di berbagai lokasi (Pugh & Woodworth, 2014).

Gaya tarik gravitasi bulan bekerja tidak merata di seluruh permukaan bumi. Pada sisi bumi yang menghadap bulan, gaya tarik bulan lebih besar dibandingkan di pusat bumi, sehingga massa air laut tertarik ke arah bulan dan membentuk tonjolan pasang (*tidal bulge*) seperti pada Gambar 2.6. Sebaliknya, pada sisi bumi yang berlawanan dengan bulan, gaya tarik bulan lebih kecil dibandingkan gaya sentrifugal sistem bumi-bulan yang besarnya relatif sama di seluruh bumi. Ketidakseimbangan ini menyebabkan terbentuknya tonjolan pasang kedua di sisi berlawanan. Akibatnya, secara ideal akan terbentuk dua daerah pasang tinggi dan dua daerah pasang rendah dalam satu kali rotasi bumi (Pugh & Woodworth, 2014).



Gambar 2.6 Pergerakan air laut akibat gaya gravitasi bulan dan matahari (Pugh & Woodworth, 2014).

Selain bulan, matahari juga memberikan kontribusi terhadap gaya pembangkit pasang surut. Ketika matahari, bulan, dan bumi berada pada satu garis lurus (fase bulan baru dan bulan purnama), gaya tarik bulan dan matahari saling menguatkan sehingga menghasilkan pasang purnama (*spring tide*) dengan kisaran pasang surut yang lebih besar. Sebaliknya, saat posisi bulan dan matahari membentuk sudut sekitar 90° terhadap bumi (fase perbani), gaya tarik keduanya saling melemahkan dan menghasilkan pasang perbani (*neap tide*) dengan kisaran pasang surut yang lebih kecil (Pugh & Woodworth, 2014).

Menurut teori dinamis, pembentukan dan karakteristik pasang surut sangat dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika perairan, seperti kedalaman dan luas perairan, pengaruh rotasi bumi melalui gaya coriolis, serta gesekan dasar laut. Gaya coriolis menyebabkan pembelokan arah gerak massa air, ke kanan di belahan bumi utara dan ke kiri di belahan bumi selatan, dengan pengaruh yang meningkat seiring bertambahnya lintang dan kecepatan aliran. Kedalaman perairan turut memengaruhi perambatan gelombang pasut, di mana pada perairan dalam gelombang pasut cenderung merambat lebih sederhana dibandingkan perairan dangkal. Di wilayah pantai dan perairan dangkal, amplitudo pasang surut umumnya lebih besar, bahkan

dapat meningkat secara signifikan apabila terjadi resonansi antara periode pasang surut dan periode alami perairan (Pugh & Woodworth, 2014).

Dalam kondisi nyata, respons laut terhadap gaya pembangkit pasang surut tidak hanya ditentukan oleh gaya astronomis tersebut, tetapi juga dipengaruhi oleh rotasi bumi, bentuk cekungan laut, kedalaman perairan, gesekan dasar, serta konfigurasi garis pantai. Faktor-faktor ini menyebabkan perbedaan amplitudo, fase, dan tipe pasang surut di setiap wilayah perairan, sehingga pola pasang surut yang teramati di alam bersifat lebih kompleks dibandingkan gambaran pasang surut setimbang ideal (Pugh & Woodworth, 2014).

2.6 Pengaruh Meteorologis Terhadap Pasang Surut Air Laut

Perubahan muka air laut tidak hanya dipengaruhi oleh gaya pembangkit pasang surut akibat interaksi gravitasi Bumi, Bulan, dan Matahari, tetapi juga oleh faktor-faktor nonastronomis atau meteorologis. Faktor utama yang memengaruhi perubahan tersebut adalah variasi tekanan atmosfer dan hembusan angin di atas permukaan laut. Pengaruh kedua faktor tersebut menyebabkan tinggi muka air laut yang teramati dapat berbeda dari nilai pasang surut yang diprediksi secara astronomis. Komponen perubahan muka air laut yang berasal dari pengaruh meteorologi ini dikenal sebagai residual meteorologis (*meteorological residual*) atau *storm surge* apabila menghasilkan kenaikan muka air laut yang signifikan (Pugh & Woodworth, 2014).

Storm surge merupakan kenaikan atau penurunan muka air laut yang dipicu oleh kombinasi tekanan udara rendah dan gaya geser angin di permukaan laut. Fenomena ini umumnya berkembang secara bertahap selama berlangsungnya badai dan dapat meningkatkan elevasi muka air laut hingga beberapa meter di atas kondisi normal. Dampak yang paling besar terjadi ketika *storm surge* bertepatan dengan pasang purnama (*spring tide*), sehingga menghasilkan elevasi muka air laut yang jauh lebih tinggi dibandingkan apabila kedua fenomena tersebut terjadi secara terpisah. Kombinasi tersebut menjadi salah satu penyebab utama terjadinya banjir pesisir di berbagai wilayah dunia (Pugh & Woodworth, 2014).

2.7 Metode Pengukuran Pasang Surut Air Laut

Pengukuran pasang surut merupakan salah satu komponen utama dalam pemantauan perubahan muka air laut. Informasi mengenai elevasi muka air sangat penting untuk berbagai keperluan, seperti analisis karakteristik pasang surut, penentuan datum vertikal, pemodelan hidrodinamika, serta studi perubahan muka laut jangka panjang. Secara umum, teknik pengukuran pasang surut dapat dikelompokkan menjadi dua metode utama, yaitu pengukuran *in situ* dan pengukuran berbasis penginderaan jauh (*remote sensing*). Masing-masing metode memiliki karakteristik, keunggulan, dan tingkat akurasi yang berbeda sesuai dengan tujuan pengamatan.

2.7.1 Tide Gauge

Tide gauge adalah salah satu instrument dalam pemantauan pasang surut. Pada dasarnya alat tersebut digunakan untuk memudahkan dalam pengambilan data pasang surut persatuan waktu yang dimana awalnya menggunakan palem pasang surut yang dipantau secara manual. Pada umumnya *tide gauge* dilengkapi dengan beberapa sensor yaitu sensor tekanan dan radar memancarkan gelombang suara untuk mengukur ketinggian muka air laut (Alajuri dkk., 2025). Pada Gambar 2.7 merupakan bangunan milik Badan Informasi Geospasial yang terdapat *tide gauge* yang dapat mencatat naik turunnya air laut dalam satuan waktu.



Gambar 2.7 Stasiun Pasang Surut Konvensional (Badan Informasi Geospasial, 2024)

2.7.2 Altimetri

Satelit altimetri merupakan salah satu teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) yang digunakan untuk mengamati dinamika lautan, khususnya perubahan tinggi muka air laut (*Sea Surface Height* atau SSH), dengan cakupan spasial yang luas. Satelit altimetri seperti TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, dan Sentinel-3 SRAL mengukur jarak antara satelit dan permukaan laut menggunakan gelombang radar. Dengan mengombinasikan hasil pengukuran tersebut dengan informasi orbit satelit yang presisi, diperoleh estimasi *Sea Surface Height* (SSH) terhadap ellipsoid referensi. Pemanfaatan teknologi ini memungkinkan pemantauan tinggi muka air laut secara kontinu pada skala regional hingga global (Hariyadi dkk., 2017 dalam Lase & Nadzir, 2025).

2.8 Pemodelan Hidrodinamika

Hidrodinamika adalah salah satu cabang keilmuan fisika yang membahas tentang fenomena yang terjadi pada fluida baik yang terjadi akibat pengaruh dari luar maupun interaksi antar fluida itu sendiri. Pada dasarnya fluida dibagi atas dua yaitu fluida inkompresible dan fluida kompresible. Fluida inkompresible memiliki perbedaan pada ketidakadaan kemungkinan perubahan tekanan yang terjadi pada fluida berbanding terbalik dengan fluida kompresible (Zahra, 2024). Pada dasarnya dalam studi pemodelan hidrodinamika perairan terbuka baik laut, sungai, maupun waduk selalu menggunakan fluida kompresible dalam mengasumsikan fenomena yang terjadi.

Selain itu pemodelan hidrodinamika bertumpu pada persamaan kontinuitas dan persamaan momentum. Pada perangkat lunak pemodelan hidrodinamika Delft 3D-flow menggunakan komputasi dengan persamaan dasar 2.10 untuk menghitung momentum x dan persamaan 2.11 untuk menghitung momentum y untuk memodelkan pola aliran air (Ritista dkk., 2019).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial(V^2)}{\partial x} + V \frac{\partial(UV)}{\partial y} - fV = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_x - \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2(d + \zeta)} + M_x \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial(UV)}{\partial x} + V \frac{\partial(U^2)}{\partial y} - fU = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y - \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2(d + \zeta)} + M_y \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk menghitung kontinuitas rata rata kedalaman (z) dalam 2D menggunakan persamaan 2.12 berikut (Ritista P. Atmaja dkk., 2019).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(U(d + \zeta))}{\partial x} + \frac{\partial(V(d + \zeta))}{\partial y} = Q \quad (2.12)$$

Dengan U dan V didefinisikan pada persamaan 2.13 dan 2.14 sebagai berikut (Ritista P. Atmaja dkk., 2019).

$$U = \frac{1}{d + \zeta} + \int_d^\zeta u \, dz \quad (2.13)$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} + \int_d^\zeta v \, dz \quad (2.14)$$

Dimana :

- U, V : Kecepatan rata-rata terhadap kedalaman horizontal (m/s)
- x, y : Koordinat Kartesian horizontal
- f : Parameter Coriolis ($1/s$)
- ρ_0 : Densitas air (kg/m^3)
- P_x, P_y : Gradien tekanan hidrostatik ($kg/m^2 s^2$)
- F_x, F_y : Fluks momentum turbulensi (m/s^2)
- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)
- C_{2D} : Koefisien Chezy 2D ($m^{1/2}/s$)
- M_x, M_y : Momentum eksternal (m/s^2)
- H : Kedalaman (m) = $d + \zeta$
- n : Koefisien Manning ($m^{-1/3} s$)
- d : Kedalaman perairan (m)
- ζ : Elevasi muka air (m)
- Q : Debit/satuan luas (m/s)

Persamaan numerik tersebut merupakan persamaan untuk membangun model hidrodinamika dimana dapat ditentukan nilai tinggi *water level* dan kecepatan arus beserta arah arus.

2.9 Peta Pasang Surut

Peta Pasang surut pada dasarnya merupakan penggambaran dari bagaimana pengaruh suatu fenomena gaya penggerak pasang surut disuatu wilayah yang digambarkan dalam bentuk peta *co-amplitudo* dan *co-phase* dari setiap parameter harmonik pasang surut (Su & Wang, 2013). Peta kotidal (*co-tidal chart*) terdiri dari peta ko-amplitudo (*co-amplitude chart*) dan ko-fase merepresentasi spasial yang menggambarkan distribusi fase dan amplitudo pasang surut di suatu wilayah perairan. Penyusunan peta tersebut umumnya didasarkan pada hasil pengamatan muka air laut maupun tekanan dasar laut. Akan tetapi, di wilayah lepas pantai ketelitian peta sering kali terbatas akibat sedikitnya data pengamatan yang tersedia. Untuk meningkatkan akurasi, informasi tersebut dapat dilengkapi dengan data konstituen harmonik arus rata-rata terhadap kedalaman (*depth-averaged currents*), karena perubahan elevasi muka air dan arus pasang surut saling berkaitan melalui persamaan momentum dan persamaan kontinuitas (Pugh & Woodworth, 2014).

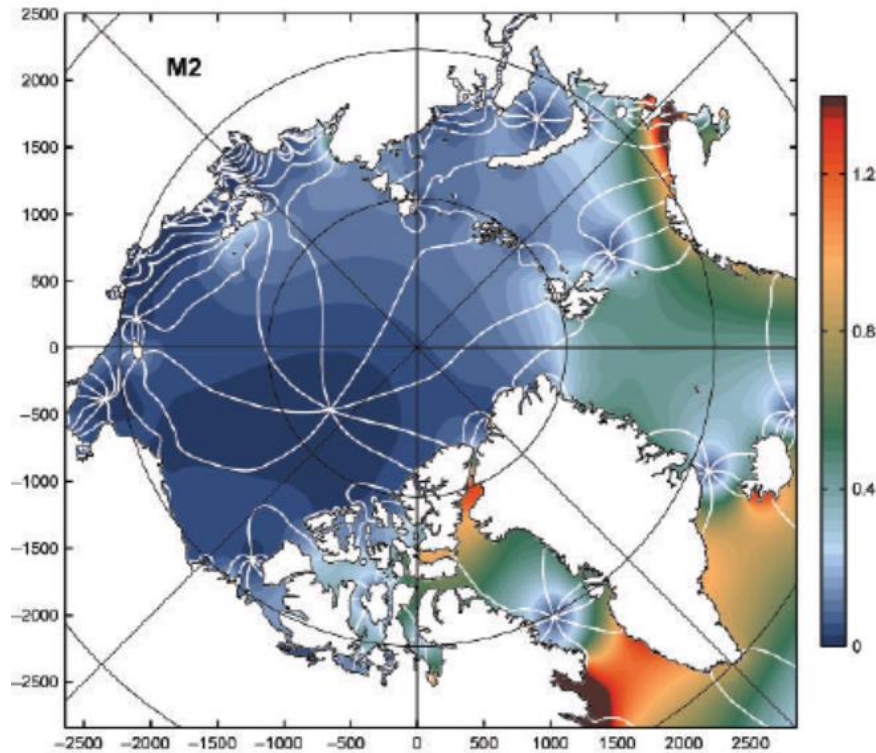
Di wilayah pesisir, arah arus pasang surut umumnya mengikuti orientasi garis pantai sehingga memengaruhi pola distribusi garis kotidal dan ko-amplitudo. Akibatnya, garis-garis kotidal cenderung berkumpul di sekitar tanjung (*headland*) dan menjadi lebih renggang di daerah teluk (*bay*). Fenomena tersebut juga menyebabkan perubahan rentang pasang surut (*tidal range*) berlangsung lebih cepat di sekitar tanjung dibandingkan di wilayah teluk. Pola ini merupakan salah satu karakteristik penting dalam dinamika pasang surut di kawasan pesisir dan sering dimanfaatkan dalam interpretasi hasil pemodelan hidrodinamika maupun analisis propagasi gelombang pasang surut (Pugh & Woodworth, 2014).

2.9.1 Peta Co-Amplitude

Peta *co-amplitude* atau *co-range* merupakan salah satu bentuk representasi spasial karakteristik pasang surut yang menggambarkan sebaran amplitudo gelombang pasang surut pada suatu wilayah perairan. Amplitudo pasang surut didefinisikan sebagai setengah dari selisih antara muka air tertinggi (*air pasang*) dan muka air terendah (*air surut*) untuk suatu konstituen harmonik tertentu. Dengan demikian, peta *co-amplitude* memberikan informasi mengenai besarnya respons muka air laut terhadap gaya pembangkit pasang surut di berbagai lokasi secara spasial. Secara dinamis, besarnya rentang pasang surut mencerminkan respons perairan terhadap gaya pembangkit astronomis yang dipengaruhi oleh kedalaman, geometri cekungan, dan mekanisme disipasi energi. Dalam cekungan laut yang luas dan relatif dalam, pasang surut terutama dibangkitkan secara langsung oleh gaya gravitasi bulan dan matahari, sedangkan pada laut dangkal dan perairan paparan benua (*shelf seas*), pasang surut berkembang melalui proses *co-oscillation* dengan pasang surut samudera terbuka, sehingga pola *co-range* sangat dipengaruhi oleh propagasi energi pasang surut dari laut lepas ke wilayah dangkal.

Penyusunan peta *co-amplitude* dilakukan berdasarkan nilai amplitudo dari masing-masing konstituen harmonik pasang surut yang diperoleh melalui analisis harmonik atau hasil pemodelan hidrodinamika. Setiap konstituen harmonik, seperti M2, S2, K1, dan O1, memiliki karakteristik amplitudo yang berbeda-beda akibat perbedaan mekanisme pembangkitan dan perambatan gelombang pasang surut. Oleh karena itu, peta *co-amplitude* umumnya disajikan secara terpisah untuk setiap konstituen harmonik agar variasi spasial amplitudo dapat dianalisis secara lebih spesifik.

Peta *co-amplitude* yang disajikan pada penelitian ini menggambarkan distribusi amplitudo pasang surut berdasarkan tinggi gelombang dan karakter propagasi pasang surut untuk setiap konstituen harmonik. Garis kontur pada peta tersebut menunjukkan nilai amplitudo gelombang pasang surut atau besarnya fluktuasi muka air laut di setiap area perairan (Sugianto dkk., 2020). Contoh peta *co-amplitude* ditunjukkan pada Gambar 2.8, yang memperlihatkan variasi amplitudo pasang surut, dimana perbedaan amplitudo antar lokasi mencerminkan pengaruh morfologi dan dinamika perairan terhadap karakter pasang surut.



Gambar 2.8 Contoh Peta *Co-Amplitude* (Pugh & Woodworth, 2014).

Secara teoritis, peta *co-range* tidak dapat dipisahkan dari keberadaan sistem amphidromik. Akibat rotasi bumi dan pengaruh gaya Coriolis, gelombang pasang surut tidak membentuk garis simpul lurus seperti pada gelombang berdiri tanpa rotasi, melainkan berotasi mengelilingi suatu titik dengan amplitudo mendekati nol yang disebut *amphidromic point*. Dari titik ini, nilai rentang pasang surut meningkat secara radial ke arah luar, yang divisualisasikan pada peta *co-range* dalam bentuk garis-garis yang menghubungkan lokasi dengan nilai rentang pasang surut yang sama. Perpindahan posisi *amphidromic point* dan perubahan pola *co-range* dapat terjadi akibat kehilangan energi gelombang melalui gesekan dasar laut, interaksi dengan topografi, serta refleksi gelombang, sebagaimana ditunjukkan dalam teori gelombang panjang pada bumi berotasi (Pugh & Woodworth, 2014).

Peta *co-range* digunakan bersama dengan peta *co-phase* untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai dinamika pasang surut. Jika peta *co-phase* menggambarkan arah dan waktu perambatan gelombang pasang surut, maka peta *co-range* menunjukkan intensitas respon muka air laut di setiap lokasi. Buku *Ocean Tides* menjelaskan bahwa variasi rentang pasang surut yang besar umumnya ditemukan pada

wilayah dengan respons hampir resonan terhadap frekuensi semidiurnal, sedangkan rentang yang kecil dijumpai di sekitar amphidromic point atau pada cekungan dengan suplai energi pasang surut yang terbatas. Oleh karena itu, peta *co-range* memiliki peran penting dalam analisis pasang surut global maupun regional, khususnya untuk memahami distribusi energi pasang surut, pengaruh morfologi perairan, serta implikasinya terhadap dinamika pesisir dan laut dangkal (Pugh & Woodworth, 2014).

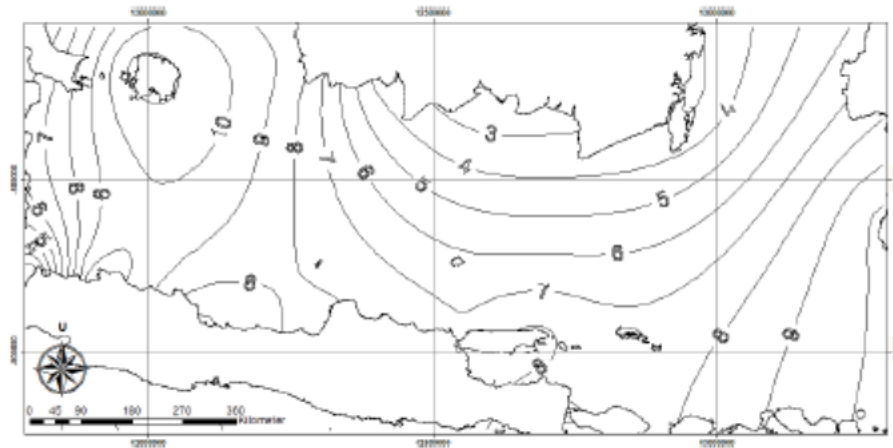
2.9.2 Peta Co-Phase

Peta *co-phase* merupakan peta yang menampilkan distribusi fase pasang surut secara spasial untuk suatu konstituen harmonik tertentu. Pada peta ini, garis kontur menghubungkan titik-titik yang memiliki nilai fase pasang surut yang sama, yang umumnya dinyatakan dalam satuan waktu air tinggi atau fase sudut yang telah dikonversi ke satuan jam. Dengan demikian, peta *co-phase* memberikan gambaran mengenai pola perambatan gelombang pasang surut di suatu wilayah perairan.

Dalam teori pasang surut dinamis, dikenal adanya amphidromic point, yaitu suatu lokasi di perairan dimana amplitudo pasang surut bernilai sangat kecil atau mendekati nol, sehingga hampir tidak terjadi pergerakan vertikal muka air laut. Di sekitar titik amphidromik ini, garis-garis kontur fase pada peta *co-phase* tersusun melingkar dan menunjukkan pola rotasi fase pasang surut searah atau berlawanan arah jarum jam, bergantung pada karakteristik dinamika perairan dan pengaruh gaya Coriolis (Pugh & Woodworth, 2014).

Nilai fase pada peta *co-phase* umumnya disajikan dalam bentuk angka pada setiap garis kontur yang menunjukkan waktu terjadinya air tinggi dalam satuan jam. Perbedaan nilai waktu antar kontur mencerminkan arah dan kecepatan perambatan fase pasang surut. Kontur fase yang tersusun rapat menunjukkan adanya perubahan fase yang cepat dalam jarak spasial yang relatif pendek, yang mengindikasikan gradien fase yang besar dan perambatan gelombang pasang surut yang relatif cepat. Sebaliknya, kontur fase yang lebih renggang menunjukkan perubahan fase yang lebih lambat terhadap jarak, sehingga perambatan gelombang pasang surut berlangsung secara lebih gradual (Pugh & Woodworth, 2014).

Pola kerapatan kontur pada peta *co-phase* juga memberikan informasi penting mengenai dinamika gelombang pasang surut di suatu perairan. Daerah dengan kontur yang sangat rapat sering kali berkaitan dengan pengaruh morfologi perairan, seperti penyempitan selat, perubahan kedalaman yang tajam, atau interaksi dengan garis pantai dan pulau-pulau kecil. Kondisi tersebut dapat menyebabkan pembelokan arah rambatan, percepatan perubahan fase, serta terbentuknya sistem gelombang berdiri parsial yang ditandai oleh keberadaan *amphidromic point* (Pugh & Woodworth, 2014).



Gambar 2.9 Contoh peta co-phase M2 (Putra & Pratomo, 2017).

Contoh peta *co-phase* untuk konstituen harmonik M2 ditunjukkan pada Gambar 2.9, yang memperlihatkan pola kontur fase pasang surut di wilayah kajian. Angka-angka pada garis kontur menunjukkan waktu perambatan air tinggi pasang surut dalam satuan jam, sedangkan pola kerapatan dan orientasi kontur menggambarkan arah serta karakter perambatan gelombang pasang surut di wilayah tersebut (Putra & Pratomo, 2017).

2.10 Mean Root Square Error (RMSE)

Mean Root Square Error (RMSE) merupakan salah satu bagian dari *cost fuction* yang digunakan dalam mengetahui seberapa baik model dalam memprediksi data. Pada kasus pemodelan hidrodinamika RMSE digunakan untuk memvalidasi model, analisis nilai RMSE tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan nilai prediksi terhadap nilai data observasi (Wilks, 2006 dalam Munawar dkk., 2020). Persamaan 2.15 merupakan persamaan RMSE untuk mengetahui seberapa nilai kesalahan rata-rata suatu model hidrodinamika dengan keadaan aktual dilapangan (Anisa dkk., 2023).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Aktual - Model)^2}{n}} \quad (2.15)$$

Persamaan 2.15 menandakan bahwa nilai aktual merupakan nilai yang berasal dari hasil pengukuran yang sebenarnya dilapangan dikurangi dengan nilai yang berasal dari model prediksi atau model hidrodinamika. Selisih tersebut dikuadratkan untuk menghilangkan nilai minus. Sugma menandakan bahwa semua data dijumlahkan, selanjutnya dibagi dengan total jumlah data yang hasil perhitungan tersebut sehingga didapatkan nilai kesalahan atau gap rata rata antara model dengan hasil aktual dilapangan. Kekurangan penggunaan *cost fuction* ini yaitu tidak dapat mengetahui data dengan gap tinggi dengan gap rendah tetapi melalui streoplot data actual dengan data model akan didapatkan data data dengan gap rendah dan gap tinggi (Munawar dkk., 2020).

2.11 Perangkat Lunak Delft3D

Delft3D merupakan perangkat lunak pemodelan hidrodinamika multidimensi yang dapat diaplikasikan dalam dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D) untuk mensimulasikan dinamika perairan pesisir, sungai, dan muara. Perangkat lunak ini mampu memodelkan

berbagai proses fisik perairan, seperti gelombang, arus, transport sedimen, kualitas air, serta aspek ekologi perairan. Dalam kajian hidrodinamika, modul utama yang digunakan adalah *FLOW module*, yang berfungsi untuk menghitung kondisi aliran dan perubahan muka air laut (water level) sebagai respons terhadap gaya pembangkit dan kondisi batas perairan.

Pada pemodelan pasang surut, *FLOW module* menyelesaikan persamaan *Navier–Stokes* tereduksi dengan asumsi *Boussinesq* dan pendekatan perairan dangkal (*shallow water approximation*). Pendekatan ini memungkinkan simulasi perambatan gelombang pasang surut melalui variasi water level secara temporal dan spasial di seluruh domain pemodelan. Dengan demikian, Delft3D dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik pasang surut, termasuk perubahan amplitudo, fase, dan pola perambatan muka air laut, terutama pada wilayah perairan pesisir dan selat yang memiliki kompleksitas morfologi dan keterbatasan data observasi (Huff dkk., 2022).

Dalam penerapannya, Delft3D menggunakan grid atau mesh komputasi sebagai domain numerik tempat seluruh proses hidrodinamika dihitung. Grid dapat disusun dengan resolusi yang bervariasi sesuai tingkat kompleksitas wilayah penelitian, sehingga area yang memerlukan ketelitian tinggi, seperti perairan pesisir, muara, atau selat sempit, dapat direpresentasikan dengan ukuran grid yang lebih rapat dibandingkan wilayah perairan terbuka. Seluruh data masukan model, seperti batimetri, diinterpolasikan ke dalam grid tersebut sehingga kondisi morfologi dasar perairan dapat direpresentasikan secara realistis dalam simulasi numerik (Huff dkk., 2022).

Keberhasilan simulasi hidrodinamika menggunakan Delft3D sangat dipengaruhi oleh kualitas data masukan (*input*). Data utama yang diperlukan meliputi batimetri, kondisi batas berupa elevasi muka air atau konstituen pasang surut, data meteorologi seperti kecepatan dan arah angin, debit sungai apabila terdapat aliran air tawar, serta parameter oseanografi lainnya, seperti salinitas dan temperatur untuk simulasi tiga dimensi. Seluruh data tersebut berperan sebagai gaya pembangkit (*forcing*) yang mengendalikan dinamika aliran dan perubahan muka air selama periode simulasi (Huff dkk., 2022).

Selain kondisi batas, Delft3D memerlukan kondisi awal (*initial condition*) sebagai representasi keadaan hidrodinamika pada awal simulasi. Kondisi awal ini dapat berupa elevasi muka air, kecepatan arus, maupun distribusi parameter kualitas air seperti salinitas dan temperatur. Penentuan kondisi awal yang sesuai akan meningkatkan stabilitas model dan mempercepat proses penyesuaian (*spin-up*) sehingga hasil simulasi menjadi lebih representatif terhadap kondisi lapangan (Huff dkk., 2022).

Proses simulasi dilakukan secara numerik dengan menyelesaikan persamaan pengatur aliran pada setiap grid komputasi untuk setiap langkah waktu (*time step*). Hasil simulasi yang dihasilkan meliputi distribusi elevasi muka air, kecepatan dan arah arus, serta parameter hidrodinamika lainnya dalam bentuk spasial maupun temporal. Output tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menganalisis pola perambatan pasang surut, distribusi arus, maupun interaksi antara proses hidrodinamika dengan karakteristik morfologi perairan (Huff dkk., 2022).

Dalam penelitian hidrodinamika pasang surut, Delft3D telah banyak digunakan karena mampu merepresentasikan proses fisis perairan dengan baik pada wilayah yang memiliki geometri pantai kompleks. Fleksibilitas dalam pengaturan grid, penerapan berbagai jenis kondisi batas, serta kemampuannya mengintegrasikan data observasi dengan model numerik menjadikan Delft3D sebagai salah satu perangkat lunak yang banyak dimanfaatkan untuk

simulasi pasang surut, analisis arus, maupun evaluasi dinamika perairan pesisir (Huff dkk., 2022).

2.12 Program *T-Tide*

T-Tide merupakan toolbox berbasis MATLAB yang dikembangkan oleh Pawlowicz, Beardsley, dan Lentz (2002) untuk melakukan analisis harmonik pasang surut pada data deret waktu muka air laut atau arus laut. Program ini banyak digunakan dalam studi oseanografi karena kemampuannya memisahkan sinyal pasang surut dari sinyal non-pasut secara statistik dan astronomis. T-Tide menggunakan pendekatan *least squares harmonic analysis* dengan frekuensi konstituen pasang surut yang telah ditentukan secara astronomis, sehingga hasil analisis berupa amplitudo, fase, serta estimasi galat (error) untuk setiap konstituen (Benharra dkk., 2025).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

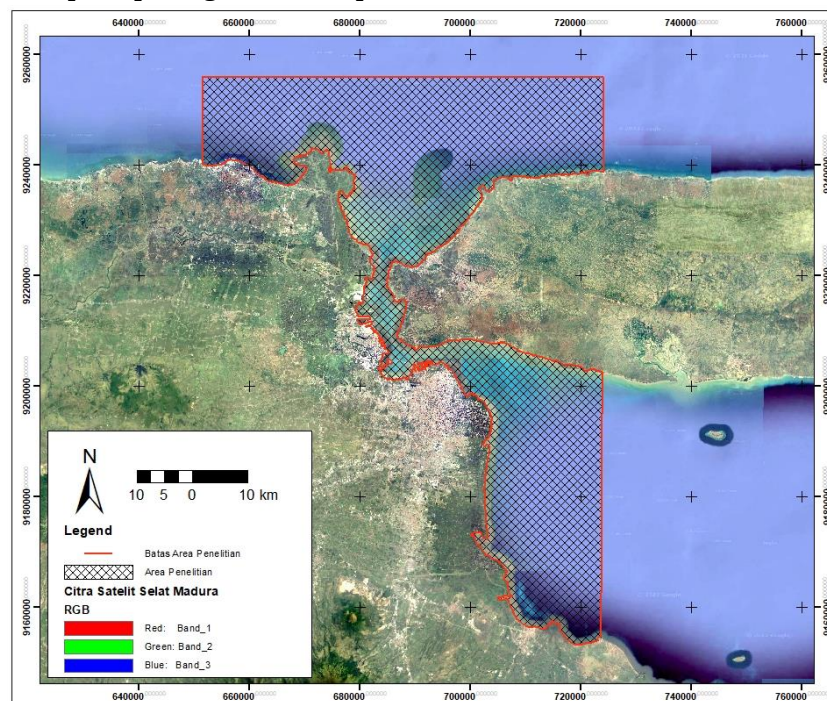
BAB 3 METODOLOGI

Penelitian tentang topik pasang surut ini menggunakan serangkain metodologi mulai dari serangkain langkah pengerjaan serta peralatan yang akan digunakan. Hal tersebut akan di rincikan pada subbab sebagai berikut.

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian utama untuk menentukan variabilitas atau perbedaan pasang surut air laut pada area Selat Madura bagian barat menggunakan hasil pemodelan hidrodinamika pasang surut dengan modul flow. Data angin dan parameter harmonik pasang surut model menjadi data input-an utama yang memengaruhi hasil dari pemodelan numerik hidrodinamika. Validasi model menggunakan data pengamatan pasang surut stasiun Badan Informasi Geospasial (BIG) sehingga dihasilkan nilai RMS Error dari hasil pemodelan. Hasil pemodelan melalui perhitungan menggunakan perangkat lunak Matlab sehingga dihasilkan nilai parameter harmonik pasang surut. Parameter harmonik pasang surut didapatkan yaitu nilai fase, amplitudo, dan frekuensi. Nilai fase dan amplitudo yang didapatkan selanjutnya dilakukan pembuatan peta pasang surut co-range. Peta tipe pasang surut menjadi tujuan utama dalam penelitian ini untuk menentukan variabilitas pasang surut dengan menggunakan perhitungan menggunakan persamaan fromzhal sehingga didapatkan perbedaan pasang surut secara spasial melalui pembuatan peta pasang surut.

Penelitian ini menggunakan data satu tahun yang mencakup dua musim yaitu musim barat dan timur. Lokasi penelitian berada pada bagian barat Selat Madura menjadi pilihan dikarenakan bentuk lautan sempit yang diapit dua pulau sehingga memungkinkan untuk terjadi perbedaan nilai parameter harmonik pasang surut yang variatif. Untuk lokasi detail pada koordinat mulai dari lintang $6^{\circ}31'42.45''$ LS - $7^{\circ}54'5.90''$ LS dengan bujur $112^{\circ}13'53.89''$ BT - $113^{\circ}10'21.29''$ BT seperti pada gambar 3.1 pada area arsiran tersebut.



Gambar 3.1 Area Penelitian

3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

Pada penelitian ini data dan peralatan yang akan digunakan untuk dilakukan pemodelan arus dan pasang surut pada bagian barat Selat Madura.

3.2 Data

Adapun data yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan data sekunder. Data tersebut akan dijabarkan pada Tabel 3.1 berikut ini beserta sumber dan kegunaannya.

Tabel 3.1 Data yang digunakan untuk membangun model hidrodinamika.

No	Jenis Data	Sumber	Fungsi
1.	Data bathimetri	GEBCO 8	Data untuk membangun domain pemodelan.
2.	Data garis pantai	InaGeoportal (BIG)	Sebagai data untuk menentukan garis pantai <i>domain</i> pemodelan hidrodinamika pasang surut.
3.	Data angin	ECMWF	Data sebagai <i>input</i> parameter untuk energi penggerak pasang surut air laut.
4.	Kostanta pasang surut	Model TPXO8	Data <i>input</i> -an parameter penggerak pasang surut berupa data harmonik pasang surut.
5.	Data pasang surut	SRGI (Stasiun Tanjung Perak) (BIG)	Sebagai data validasi hasil model hidrodinamika, data yang diambil data pergerakan pasang surut selama 1 tahun (2024) per-jam.

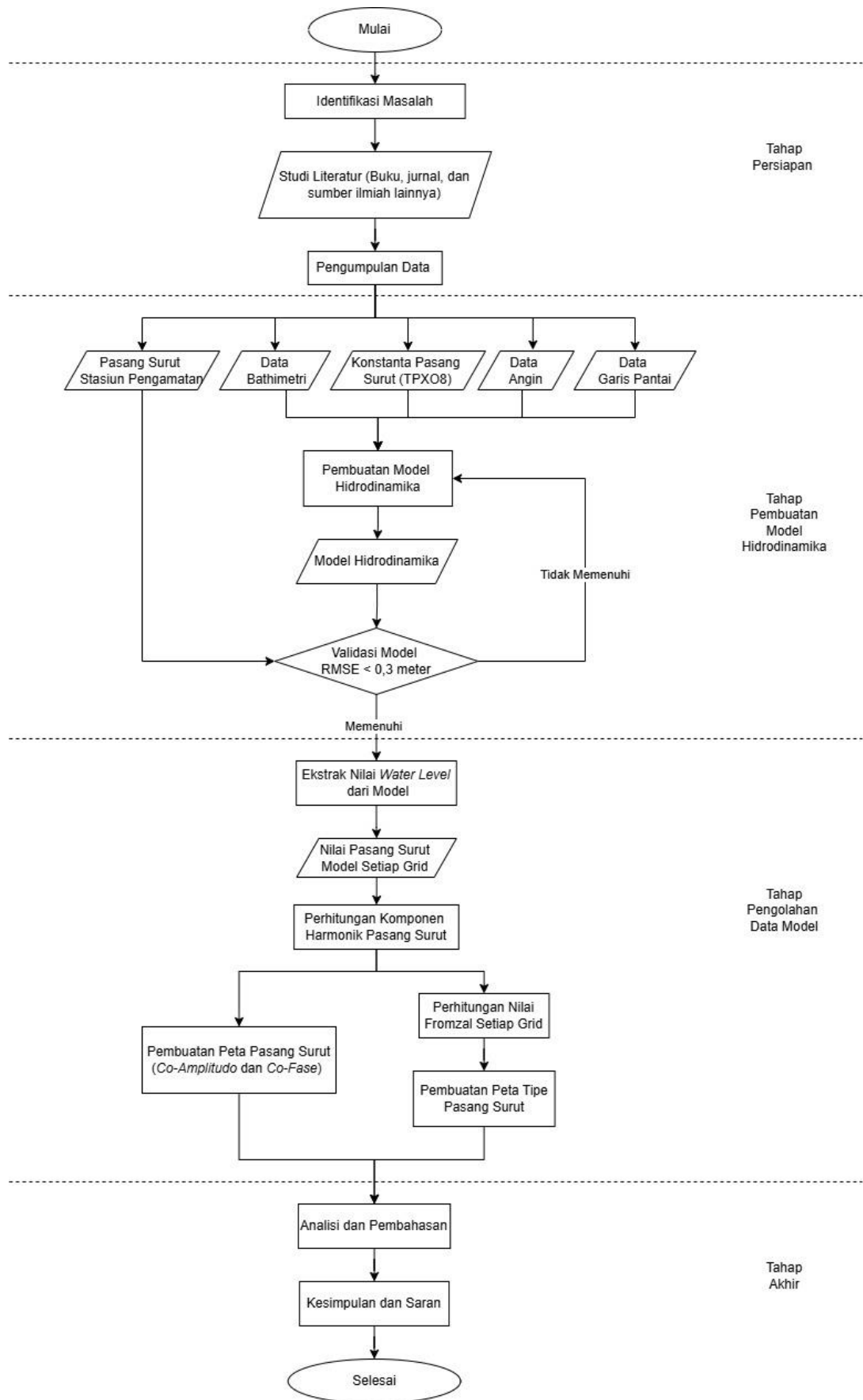
3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu menggunakan beberapa perangkat lunak sebagai berikut.

- Perangkat lunak Delft3D digunakan untuk pemodelan hidrodinamika. Alasan penggunaan Delft3D dikarenakan perangkat lunak tersebut dibangun menggunakan Matlab. Hal tersebut akan memudahkan dalam mengekstraks nilai *water level* pergrid menggunakan perangkat lunak Matlab.
- Perangkat lunak ArcGIS digunakan dalam pembuatan peta *co-range* dan peta tipe pasang surut.
- Perangkat lunak Matlab untuk mengekstrak nilai pasang surut model hidrodinamika serta menghitung nilai harmonik pasang surut menggunakan program *T-Tide* yang dibangun menggunakan perhitungan *les square*.

3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan atas beberapa langkah langkah secara umum yaitu tahap persiapan, pembuatan model hidrodinamika, ekstrak model hidrodinamika, dan tahap pembangunan peta *co-range* dan peta tipe pasang surut. Untuk lebih rincinya akan dijelaskan pada alur diagram pada gambar 3.2 serta penjelasan secara rinci pada subbab berikut.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Tahapan Persiapan

Pada tahap persiapan penelitian ini dilakukan beberapa hal yang berkaitan dengan bagaimana penentuan dari topik yang diteliti melalui beberapa bacaan, baik yang berkaitan dengan fenomena yang terjadi maupun berkaitan dengan keilmiahan. Untuk lebih jelas akan dijelaskan pada beberapa penjabaran berikut ini.

i. Identifikasi Studi

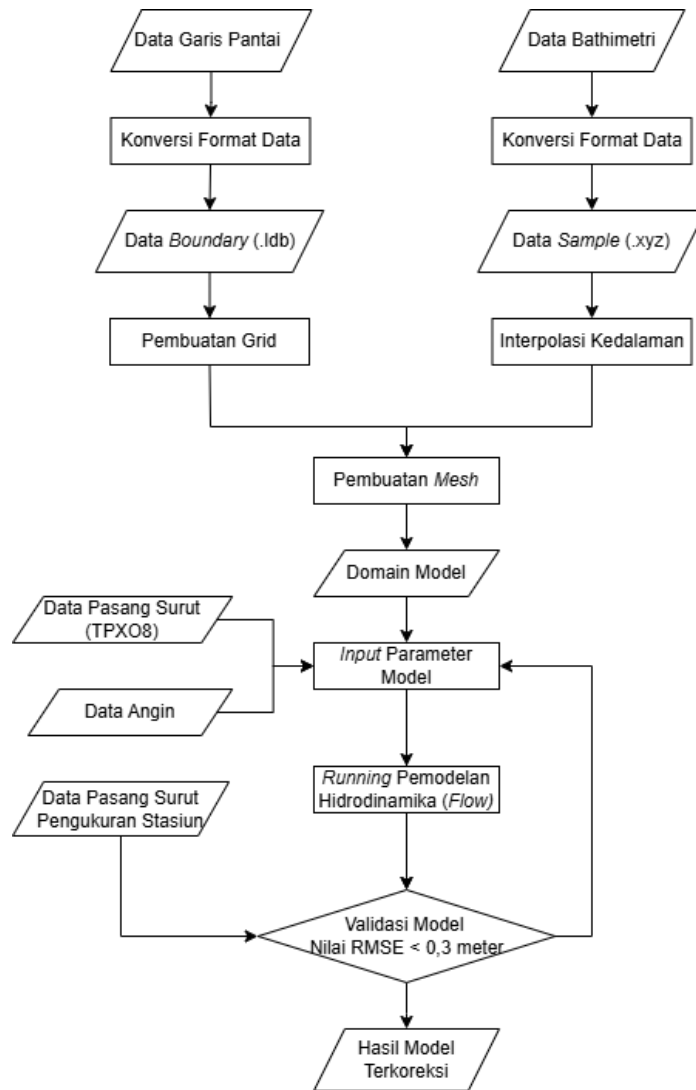
Pada tahapan identifikasi dilakukan beberapa pencarian tentang fenomena fenomena yang terjadi terkait pasang surut air laut. Pasang surut air laut dipengaruhi oleh gaya penggerak utama astronomis pengaruh gravitasi bulan atau/dan matahari yang akan menghasilkan gelombang yang merambat secara terus menerus. Gelombang tersebut merambat melalui suatu wadah yang mana hal tersebut memengaruhi dari kondisi gelombang tersebut. Tempat merambat gelombang tersebut dilakukan kajian seberapa berpengaruh wadah gelombang tersebut terhadap jenis atau perilaku pasang surut air laut.

ii. Studi Literatur

Melalui studi literatur akan menjawab beberapa pertanyaan tentang topik yang diteliti mulai dari hal-hal yang menguatkan penelitian hingga bagaimana menentukan metode serta analisis. Informasi-informasi baik dari jurnal penelitian, buku, serta beberapa sumber kredible lainnya menjadi penunjang pikiran dalam melaksanakan penelitian sehingga penelitian yang dilakukan sesuai dengan kaidah dan asas keilmiahan. Hal itu mengakibatkan dihasilkan beberapa fokus literatur yang berkaitan dengan pasang surut air laut serta berkaitan dengan fenomenanya.

3.3.2 Tahap Pembuatan Model Hidrodinamika

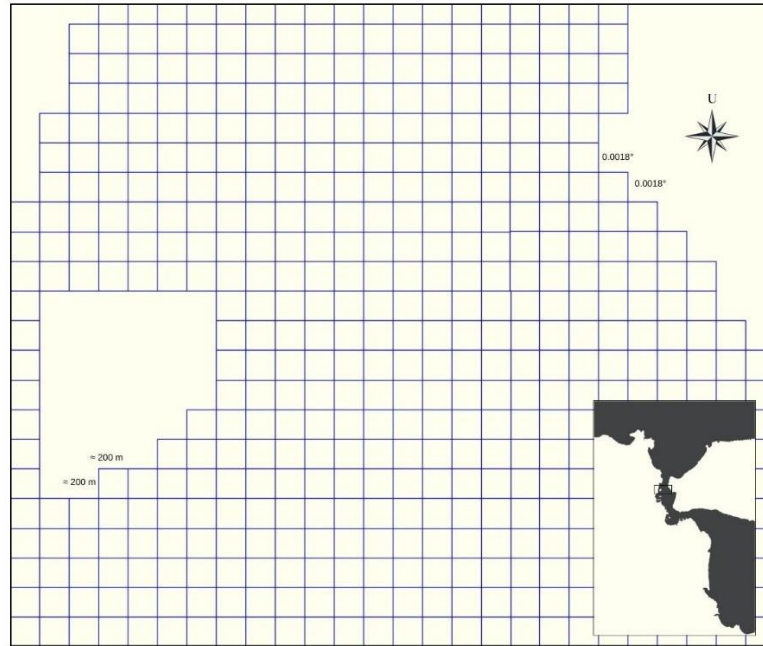
Pada dasarnya pada tahap ini data *input*-an berupa data angin dan data konstanta pasang surut dilakukan komputasi menjadi data model hidrodinamika berbentuk tinggi air laut persatuan waktu sehingga didapatkan data pasang surut secara lebih detail dan menyeluruh pada area bagian barat Selat Madura. Berikut pada gambar 3.3 dijabarkan alur pemodelan hidrodinamika serta penjelasannya pada subbab berikutnya.



Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan model hidrodinamika

i. Pembuatan Grid

Pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak Delft3D modul *flow* yang mana pertama dilakukan persiapan data model melalui konversi beberapa data. Pada menu *Quickplot* dilakukan konversi data *.shp* menjadi data *land boundary (.dbf)* sebagai batas darat dan laut pada pemodelan. Pendefinisian garis pantai model (*boundary condition*) pada penelitian ini menggunakan data dari *shapefile* batas wilayah milik Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan rincian area yaitu lintang 6°31'42.45" LS - 7°54'5.90"LS dengan bujur 112°13'53.89" BT - 113°10'21.29" BT sesuai garis pantainya. Pada modul *RGFGRID import* data *.dbf* sebagai data garis pantai acuan dari pembuatan *grid*. Melalui *boundary (*.dbf)* dilakukan *meshing* dengan grid 200 x 200 meter dengan tipe *mesh* terstruktur persegi (*rectangular grid*).



Gambar 3.4 Grid pada domain model hidrodinamika.

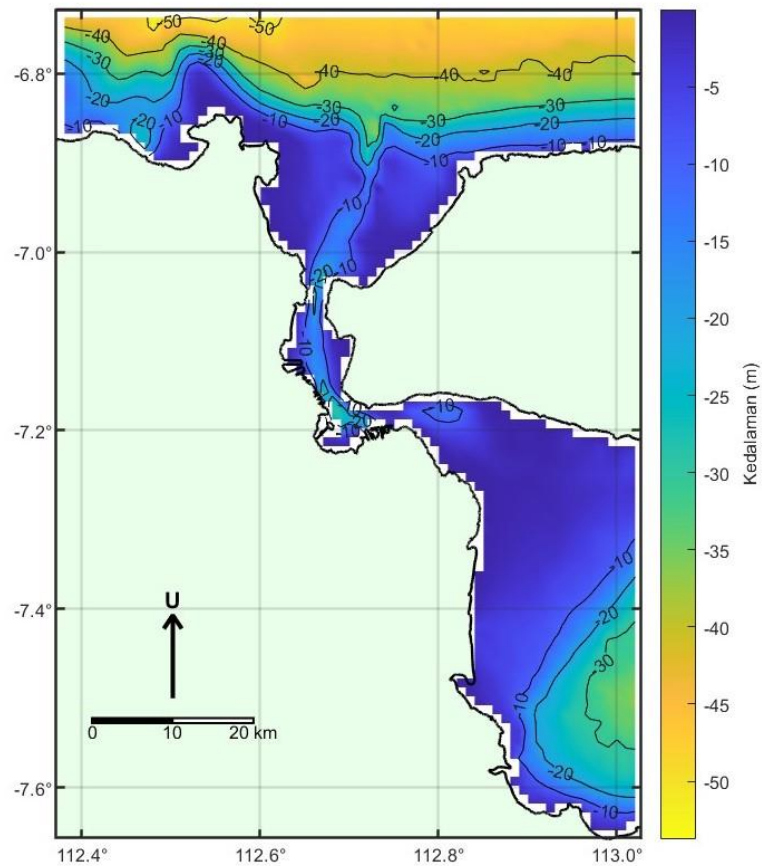
Hasil grid seperti pada Gambar 3.4 dengan rincian jumlah grid sebanyak 68769 buah dengan jumlah m pada grid yaitu 364 dan m sejumlah 515 seperti pada Tabel 3.2 dengan rincian sedemikian rupa.

Tabel 3.2 Komponen pada grid penelitian

Komponen	Jumlah/Rincian
Ukuran Grid	0.0018° x 0.0018° atau ≈ 200 x 200 meter
Koordinat Grid	6°31'42.45" LS - 7°54'5.90"LS 112°13'53.89" BT - 113°10'21.29" BT
Jumlah Grid	68769
Jumlah m	364
Jumlah n	515

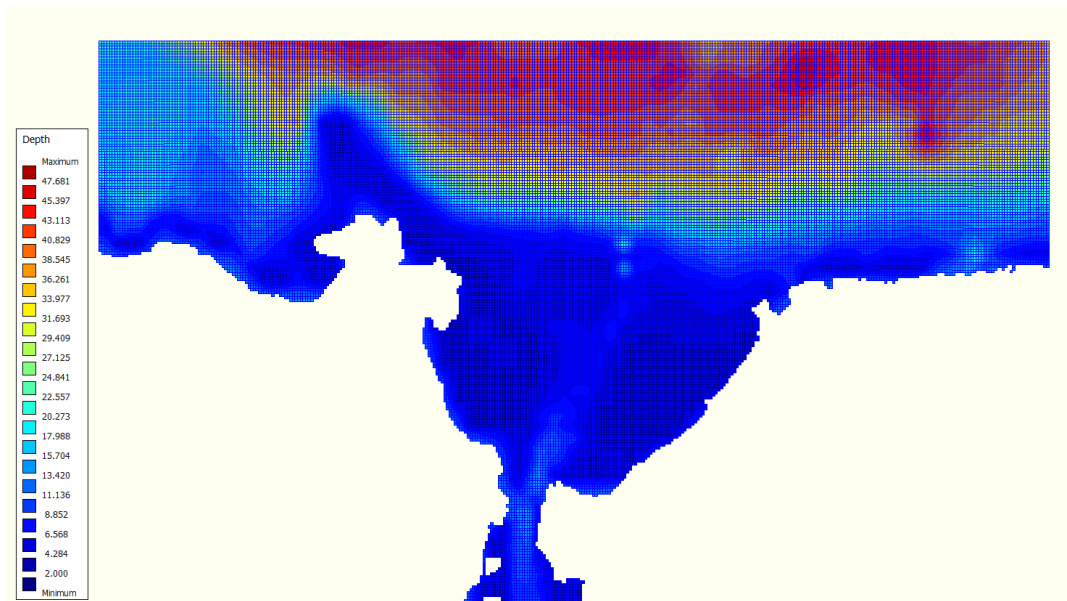
ii. Meshing

Data bathimetri yang masih dalam bentuk *raster* seperti pada Gambar 3.5 juga dilakukan konversi ke data *point* sehingga didapatkan nilai koordinat xyz yang selanjutnya di-*export* nilai ke bentuk *.txt*. Pada area penelitian ini memiliki nilai kedalaman yang beragam pada area Laut Jawa memiliki kedalaman sekitar 40 meter serta untuk area sempit Selat Madura memiliki kisaran kedalaman berkisar 0-30 meter.



Gambar 3.5 Data kedalaman Gebco08 pada area penelitian.

Untuk menjadi data *.xyz* yang *comparable* untuk di input kedalam Delft3D lakukan konversi pada *folder* penyimpanan melalui *directory*. Melalui data sampel tersebut pada *tools* QUICKIN dilakukan interpolasi data bathimetri sesuai dengan area *grid* yang telah dibentuk sebelumnya. Pada penelitian ini menggunakan interpolasi *Triangulation* sebagai metode dalam interpolasi data kedalaman. Pada Gambar 3.6 merupakan hasil *meshing* berupa data kedalaman untuk area atas penelitian ada Laut Jawa. Untuk mengisi area kosong pada *grid* dilakukan *internal diffusion*. Serta agar simulasi pemodelan berjalan tanpa *blow up* dilakukan *smoothing*. Setelah semua selesai *export* data hasil interpolasi tersebut dalam bentuk **.dep*.



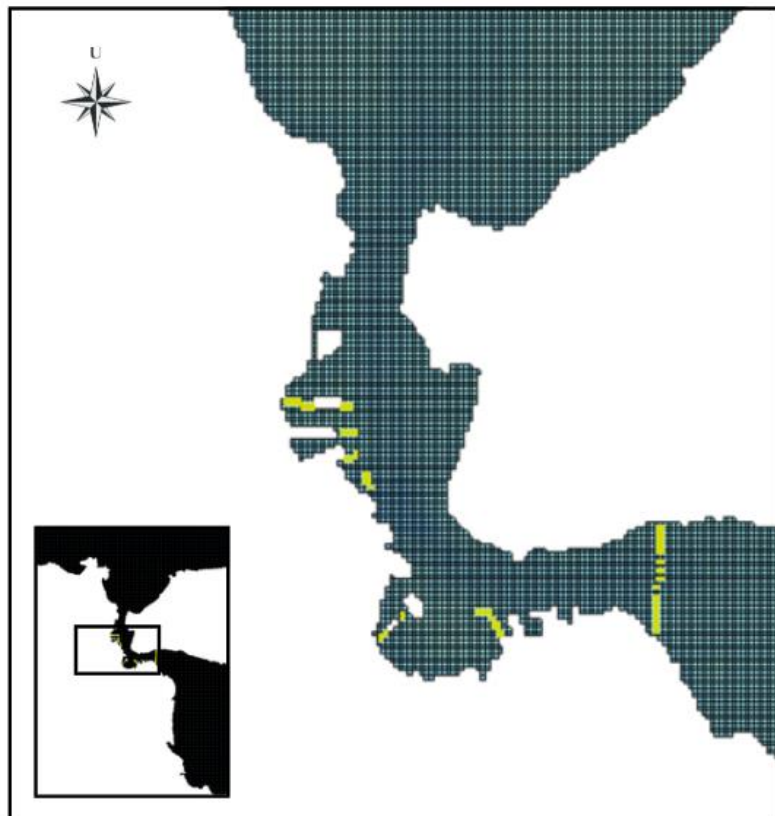
Gambar 3.6 Hasil *meshing* data kedalam ke dalam grid

iii. Simulasi Model

Penelitian ini menggunakan modul *flow* dengan data *input*-an data konstanta pasang surut dari model TPXO8 dengan data angin yang berasal dari data ECMWF. Pada model tersebut memiliki langkah proses yaitu *Domain*, *Time Frame*, *Processes*, *Initial Condition*, *Boundary*, *Physical Parameters*, *Numerical Parameters* dan *Monitoring* yang akan dijelaskan pada runtutan berikut.

1. *Domian*

Pada langkah ini akan didefinisikan *grid* dan data kedalam yang berarti pada *domain* input data *grid* dan data *.dep* yang telah didefinisikan sebelumnya. Selain itu *input* data *dry points* sebagai yang pada kenyataan wilayah tersebut tidak terendam air. *Input Thin dams* untuk mendefinikan wilayah yang terdapat hambatan yang dapat membelokkan arah arus semisalnya bangunan pemecah gelombang. Pada penelitian ini hanya menggunakan *tins* untuk area jembatan khususnya tiang Jembatan Suramadu serta area jeti pada gugusan pelabuhan di Tanjung Perak dan Teluk Lamongan seperti pada Gambar 3.7. Warna kuning pada Gambar 3.7 merupakan area tempat tiang jembatan dan tiang jeti berada. Pada penelitian menggunakan *tins* sebanyak 30 buah.



Gambar 3.7 Letak *thins* pada area penelitian

2. Time Frame

Pada menu ini akan dilakukan *input* waktu rentan pemodelan serta waktu inisiasi sebagai waktu untuk dilakukan pembentukan gerakan air melalui energi

Tabel 3.3 Time frame pemodelan hidrodinamika

Time Frame	
<i>Reference date</i>	26 Desember 2023 (00 00 00)
<i>Simulation start time</i>	26 Desember 2023 (00 00 00)
<i>Simulation start time</i>	31 Desember 2024 (23 00 00)
<i>Time Step</i>	2.5 menit
Waktu inisiasi	5 hari (26 Desember – 31 Desember 2023)
Waktu simulasi model	1 tahun (1 Januari 2025 – 31 Desember 2023)

penggerak pasang surut dan angin serta beberapa energi penggerak lainnya. Pada Tabel 3.3 dijelaskan untuk lama waktu pemodelan selama satu tahun pada seluruh tahun 2024 serta waktu inisiasi selama lima hari dari 26 desember – 31 desember 2023 sebelum waktu simulasi model. Untuk *Time Step* menyesuaikan keadaan grid 200x200 meter dan kecepatan arus pada area penelitian berkisar 0-0.8 m/s. Penentuan *time step* (Δt) pada model hidrodinamika Delft3D-flow umumnya didasarkan pada kriteria kestabilan *Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)*, yang menyatakan bahwa informasi gelombang tidak boleh melampaui satu sel grid dalam satu langkah waktu. Pada penelitian ini digunakan persamaan berikut untuk menentukan *time step* yaitu pada Persamaan 3.1. Δx merupakan besar

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|u|} \quad (3.1)$$

grid sedangkan $|u|$ merupakan kecepatan arus. Besar grid yaitu 200 meter dengan kecepatan arus yang dipilih yaitu kecepatan maksimal dengan alasan bahwa dengan kecepatan maksimal 0.8 m/s agar dapat mendapatkan nilai time step maksimal. Sehingga didapatkan nilai maksimal *time step* yaitu 250 detik atau 4.2 menit. Namun pada penelitian ini mengambil nilai 2.5 menit untuk memaksimalkan hasil dari model hidrodinamika yang didapatkan.

3. Processes

Pada menu ini untuk menentukan parameter parameter yang akan diperhitungkna dalam model. Parameter tersebut akan menentukan kondisi batas (*boundary condition*) dan kondisi awal (*initial condition*). Pada bagian ini terdapat terdapat dua bagian yaitu *constituents* yang terdiri dari 4 variabel dan penggerak air secara *physical* terdiri dari 4 *input*-an seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter pemodelan hidrodinamika Delft3D

<i>Constituents</i>	<i>Physical</i>
<i>Salinity</i>	<i>Wind</i>
<i>Temperature</i>	<i>Wave</i>
<i>Pollutants and Tracers</i>	<i>Secondary flow</i>
<i>Sediments</i>	<i>Tidal Foces</i>

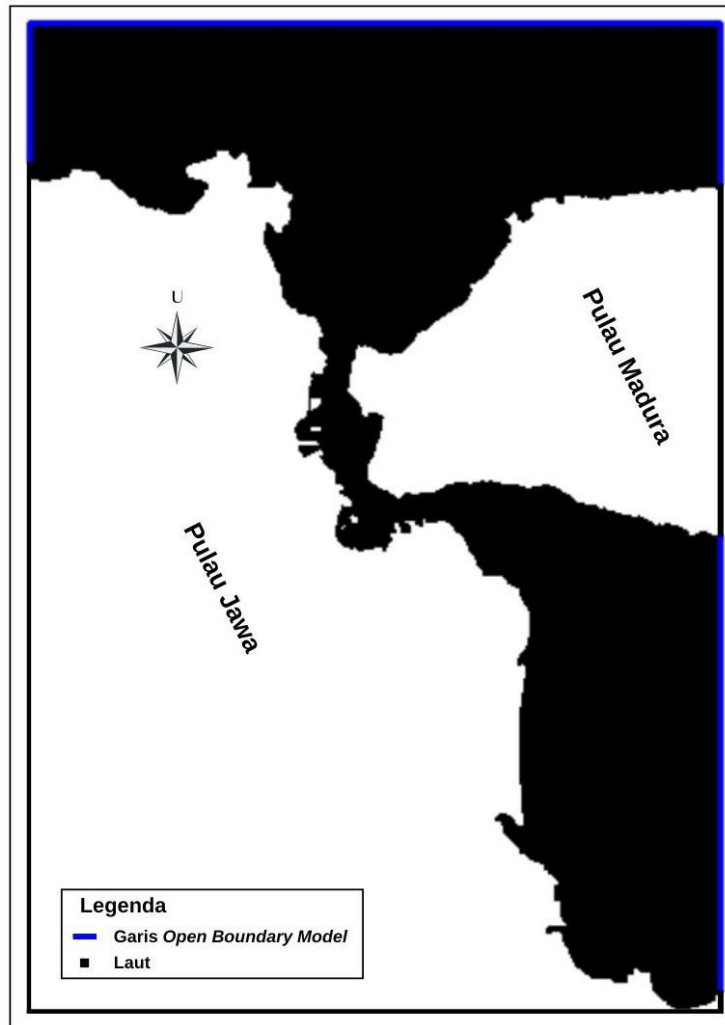
Untuk penelitian kali ini hanya akan digunakan dua parameter yaitu parameter angin (*wind*) dan parameter konstanta pasang surut model(*tidal force*). Data angin yang digunakan yaitu data angin yang berasal dari data ERA5 ECMWF (Hersbach dkk, 2020) pada tahun 2023 sampai 2024.

4. Initial Condition

Pada menu ini akan ditentukan kondisi awal dalam pemodelan. Penelitian ini menggunakan *uniform values* dengan kondisi awal dalam *Mean Sea Level* (MSL) yang berarti dalam nilai nol (0).

5. Boundary Condition

Pada menu ini ditentukan area yang berbatasan dengan laut untuk dilakukan *input* parameter astronomik berupa data angin dan kostanta pasang surut. Pada penelitian ini penentuan garis *boundary* menyesuaikan kondisi *grid* yang mana garis *boundary* pada area pinggir pantai lebih rapat dibandingkan dengan area perairan yang dalam. Pada penelitian ini garis *boundary condition* berada pada yang berhubungan dengan Laut Jawa sejumlah 3 sisi serta yang behubungan langsung dengan perairan Selat Madura seperti pada Gambar 3.8. Pada area yang



Gambar 3.8 Sebaran titik *observation point* pada grid model.

berhubungan dengan Laut Jawa sisi barat terdapat 12 garis *boundary* jarak pada pesisir atau pinggir pantai berjarak 1 sampai 3 grid sedangkan untuk area tengah berjarak 10 grid. Untuk sisi utara memiliki garis *boundary* sebanyak 37 dengan jarak konstan 10 grid. Sedangkan untuk sisi timur yang berhubungan dengan Laut Jawa memiliki garis *boundary* sebanyak 12 yang sama halnya dengan panjang garis sama dengan sisi barat. Terakhir untuk jumlah garis *boundary* untuk sisi timur yang berhubungan langsung dengan Selat Madura menggunakan 30 garis *boundary* yang sisi pesisir berjarak 1 sampai 3 grid dan sisi tengah perairan berjarak 10 grid. Untuk *flow condition* memiliki pengaturan seperti pada Tabel 3.5 dengan rincian *Type of open boundary (quantity)* menggunakan *water level*, dengan *Reflection parameter alpha* yaitu $0 s^2$, dan terakhir untuk *forcing type* menggunakan parameter *astronomic*.

Tabel 3.5 Pengaturan *flow condition*

<i>Flow Condition</i>	
<i>Type of open boundary (quantity)</i>	<i>Water Level</i>
<i>Reflection parameter alpha</i>	$0 s^2$
<i>Forcing type</i>	<i>Astronomic</i>

Type of open boundary (quantity) ditetapkan sebagai *water level*, yang berarti pendefinisian pada batas model diberikan dalam bentuk variasi elevasi muka air, bukan kecepatan atau debit aliran. *Parameter reflection alpha* diatur bernilai 0 s², yang menunjukkan bahwa refleksi gelombang pada batas terbuka diabaikan sehingga gelombang pasang surut dapat keluar masuk domain model secara bebas tanpa pantulan buatan. Selanjutnya, *forcing type* dipilih *astronomic*, yang berarti fluktuasi muka air pada batas terbuka ditentukan oleh komponen pasang surut astronomis.

Selanjutnya komponen harmonik pasang surut yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu meliputi A0 sebagai elevasi muka air rata-rata, komponen semi-diurnal yaitu M2, S2, N2, dan K2, komponen diurnal yaitu K1, O1, P1, dan Q1, serta komponen periode panjang yaitu MF dan MM. Selain itu, turut disertakan komponen pasang surut dangkal (*shallow water tides*) yang merepresentasikan interaksi nonlinier, yaitu M4, MS4, dan MN4. Setiap komponen didefinisikan berdasarkan nilai amplitudo (m) dan fase (derajat) pada batas terbuka seperti contoh pada Tabel 3.6 yang merupakan *input-an* pada titik *boundary* North01A, sehingga kombinasi semua komponen tersebut diharapkan mampu merepresentasikan karakteristik pasang surut astronomis secara komprehensif di

Tabel 3.6 Tabel contoh data *input* astronomis pada titik North01A

Komponen	Amplitudo (m)	Fase (°)
A0	0	
M2	0.42001	167.25348
S2	0.22204	216.17319
N2	0.04988	135.83161
K2	0.01176	76.92076
K1	0.46451	195.23431
O1	0.22285	146.64263
P1	0.13472	192.87706
Q1	0.03599	134.54624
MF	0.01018	11.86260
MM	0.00071	332.46505
M4	-0.00688	152.72376
MS4	-0.00688	49.61290
MN4	0.00094	217.00354

dalam domain pemodelan. Dengan pengaturan ini, dinamika pasang surut di dalam domain model sepenuhnya dikendalikan oleh gaya pasang surut astronomis pada batas terbuka, sehingga sesuai untuk simulasi perairan pesisir atau selat yang dipengaruhi dominan oleh pasang surut.

6. Physical Parameter

Menu ini digunakan untuk menentukan parameter fisik area pemodelan. Pada penelitian ini akan menggunakan *input-an constants*, *roughness*, dan *Viscosity* sesuai *default* pada Delft. Seperti pada Tabel 3.7 untuk *constants* sendiri menggunakan *default* dengan rincian terdiri dari parameter konstanta hidrodinamika dan *wind drag coefficient*. Untuk parameter konstanta

hidrodinamika pada Tabel 3.7 yaitu terdiri dari gravitasi yang di-input dengan nilai umum gravitasi 9.81 m/s², densitas air yaitu 1000 kg/m³ serta densitas udara standar yaitu 1 kg/m³. Sedangkan untuk *breakpoints* menggunakan tiga titik dengan koefisien dan kecepatan.

Tabel 3.7 Konstanta pemodelan hidrodinamika Delft3D

Constants			
<i>Hydrodynamic constants</i>	<i>Gravity</i>	9.81 m/s ²	
	<i>Water density</i>	1000 kg/m ³	
	<i>Air density</i>	1 kg/m ³	
<i>Wind drag coefficients</i>	<i>Breakpoints</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Wind speed (m/s)</i>
	A	0.00063	0
	B	0.00723	100
	C	0.00723	100

Roughness pada pemodelan penelitian ini menggunakan *default* seperti pada Tabel 3.8 dengan rincian terdiri dari *bottom roughness* dan *wall roughness*. parameter kekasaran (*roughness*) pada pemodelan hidrodinamika Delft3D-flow yang digunakan untuk merepresentasikan hambatan aliran akibat dasar dan dinding perairan. Pada *bottom roughness*, dipilih rumus *chezy*, yang menyatakan hubungan antara kecepatan aliran dan gesekan dasar; nilai *chezy* U = 65 dan V = 65 menunjukkan kekasaran seragam (*uniform*) untuk arah aliran horizontal, di mana semakin besar nilainya berarti dasar perairan semakin halus dan hambatan semakin kecil. *Wall roughness* diatur dengan *slip condition* = *Free*, yang berarti dinding tidak memberikan hambatan gesekan tambahan terhadap aliran, dan *roughness length* = 0 m menandakan pengaruh kekasaran dinding diabaikan. Pengaturan ini umumnya digunakan pada perairan terbuka seperti laut atau selat, di mana pengaruh gesekan dinding relatif kecil dibandingkan gesekan dasar.

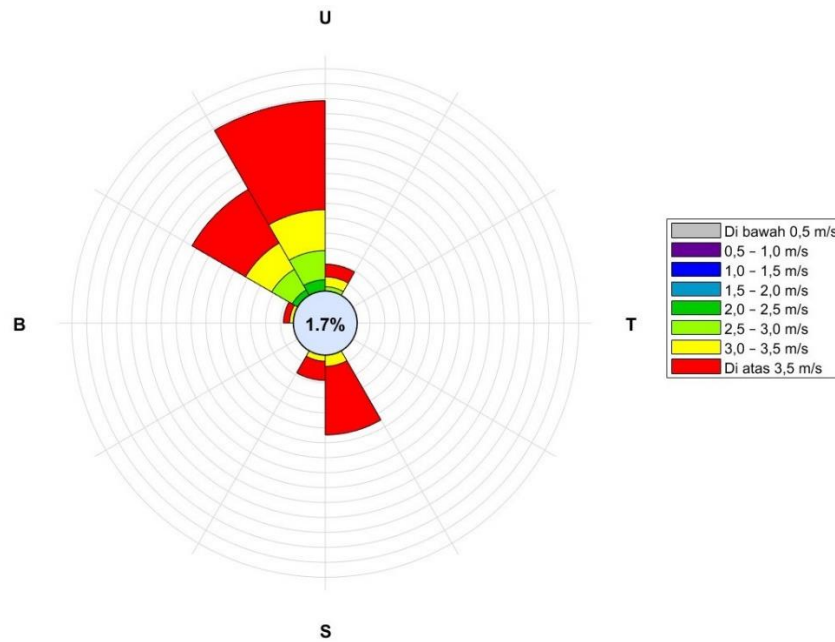
Tabel 3.8 Pengaturan *roughness* pemodelan hidrodinamika Delft3D

Roughness	
<i>bottom roughness</i>	<i>Chezy formula (Uniform: U 65 dan V 65)</i>
<i>wall roughness</i>	<i>Slip condition : Free</i>

Untuk pengaturan terkait *viscosity* atau kekentalan cairan menggunakan *default* dengan nilai horizontal *eddy viscosity* yaitu 1 m²/s. Horizontal *eddy viscosity* ditetapkan seragam (*uniform*) dengan nilai 1 m²/s, yang berarti tingkat difusi momentum diasumsikan sama di seluruh domain model. Untuk *wind parameter* pada pengaturan ini menggunakan data kosong karena *input-an* data angin ECMFWF ERA5 akan di *input* pada pengaturan *addition parameters*.

7. Addition Parameter

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian parameter sesuai dengan data yang parameter yang dibutuhkan. Pada penelitian data angin didefinisikan yang terdiri dari 3 file data angin yaitu data kecepatan angin arah u, arah v, dan data amplitudo/tekanan/serta parameter lainnya. Data angin tersebut diperoleh dari ECMWF ERA5 yang dilakukan pemisahan parameter menggunakan Matlab sehingga didapatkan file yang sesuai dengan *input-an* pada Delft3D. Gambar 3.9 merupakan gambaran kondisi angin pada area penelitian melalui *wind rose*.



Gambar 3.9 *Wind Rose* kondisi angin Selat Madura Bagian Barat

Pada area penelitian ini data angin selama 2 tahun dari 2023 sampai 2024 menunjukkan angin dominan bertiup dari arah Utara (U) dan Barat (B), yang ditunjukkan oleh sektor dengan panjang terbesar pada kedua arah tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa selama periode pengamatan, sistem angin di wilayah ini memiliki arah dominan yang jelas, dengan kontribusi frekuensi tertinggi berasal dari sektor utara–barat. Ditinjau dari kelas kecepatan angin, angin yang bertiup dari arah dominan tersebut umumnya berada pada kelas kecepatan menengah hingga tinggi, khususnya pada rentang 2,5–3,5 m/s dan diatas 3,5 m/s. Dominasi warna kuning hingga merah pada sektor utara dan barat menunjukkan bahwa angin tidak hanya sering terjadi dari arah tersebut, tetapi juga memiliki intensitas yang relatif kuat. Kondisi ini mencerminkan peran angin regional yang signifikan dalam mengontrol dinamika atmosfer dan laut pada Selat Madura bagian barat.

Untuk format *input*-an sendiri yaitu seperti pada Tabel 3.9, dimana file *.*am*

Tabel 3.9 Pengaturan pada *Addition Parameter*

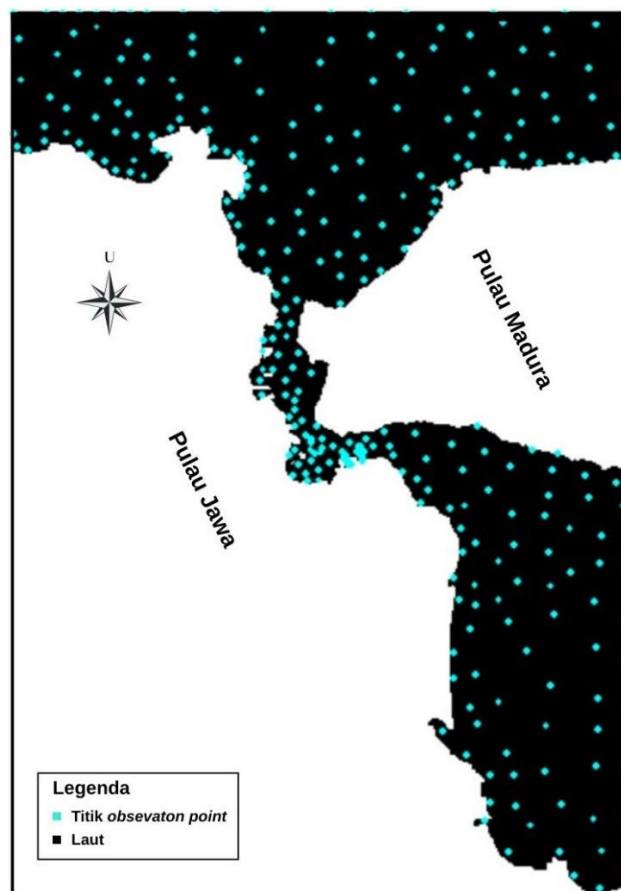
Keyword	Value
Windgrd	#A#
Filwp	#nama_data.amp#
Filwu	#nama_data.amu#
Filwv	#nama_data amv#

merupakan amplitude angin dengan tekanan angin, *.*amu* data kecepatan angin dalam arah u, dan terakhir *.*amv* merupakan kecepatan angin dalam arah v. Pada bagian ini hanya dilakukan pendefinisian dimana data harus satu *forlder* dengan *folder* simulasi agar data dapat dipanggil menjadi bahan untuk simulasi. *Addition parameter* pada penelitian ini hanya menggunakan angin sehingga data *input*-an hanya ketiga data tersebut saja.

8. Monitoring

Monitoring akan dilakukan pada area titik tempat palem stasiun pasang surut Badan Informasi Geospasial (BIG) Surabaya pada area pelabuhan Tanjung Perak. Stasiun pasang surut tanjung perak tepatnya berada pada koordinat $7^{\circ} 12' 0.216''$ LS dan $112^{\circ} 44' 26.160''$ BT yang mana tepat pada grid model $m \times n$ yaitu pada grid 206×256 .

Untuk keperluan ekstraksi data *water level* model maka beberapa titik *observation point* ditempatkan dengan jarak minimal maksimal dua kilometer antar dua titik sesuai dengan alasan dimana pasang surut dalam dua kilometer resonansinya dapat disamakan (Pugh dan Woodworth, 2014). Pada penelitian ini menggunakan titik sampel yaitu sebanyak 493 tersebar secara menyeluruh seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Sebaran titik *observation point* pada grid model.

8. Output

Pada menu ini akan ditunjukkan ringkasan dari pemodelan serta akan dilakukan pendefinisian waktu yang akan menjadi hasil dari pemodelan. Pemilihan bentuk file hasil juga ditentukan pada menu ini terdapat beberapa bentuk file penyimpanan yaitu *map*, *history*, *communication*, dan *restart file*. Pada Tabel 3.10 merupakan pengaturan untuk *store map results* yaitu dengan interval 60 menit dan *history* interval 60 menit yang berarti hasil peta (*map results*) dan file komunikasi disimpan dengan interval 60 menit, sehingga

keluaran model direkam setiap satu jam untuk keperluan analisis spasial dan temporal.

Tabel 3.10 Pengaturan *Store Map Results*

<i>Store Map Results</i>	
<i>Start time</i>	26 12 2023 00 00 00
<i>Stop time</i>	31 12 2024 23 00 00
<i>Interval</i>	60 menit
<i>History interval</i>	60 menit

Sedangkan untuk pengaturan *interval history* seperti pada Tabel 3.11 juga ditetapkan 60 menit, sedangkan *restart interval* sebesar 1440 menit (24 jam) digunakan untuk menyimpan kondisi model harian agar simulasi dapat dilanjutkan kembali apabila terjadi gangguan. Opsi *fourier analysis*, *online visualisation*, dan *export WAQ input* tidak diaktifkan, menandakan bahwa simulasi difokuskan pada perhitungan hidrodinamika tanpa analisis harmonik daring maupun integrasi langsung dengan modul kualitas air.

Tabel 3.11 Pengaturan *Store Communication File*

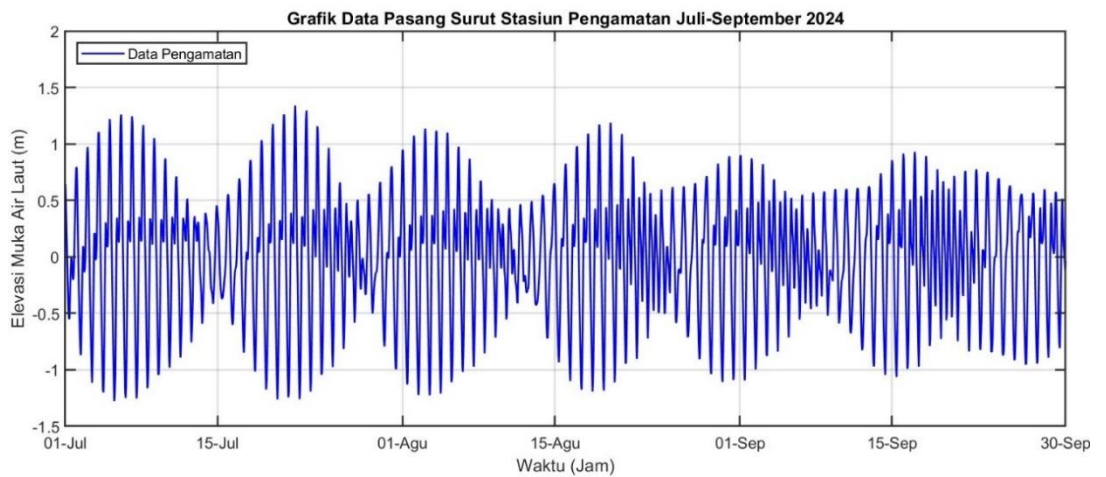
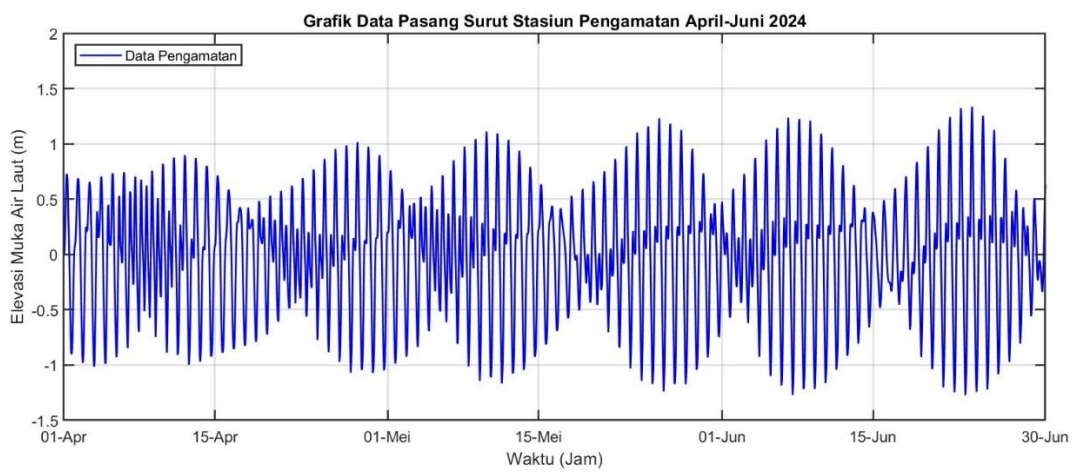
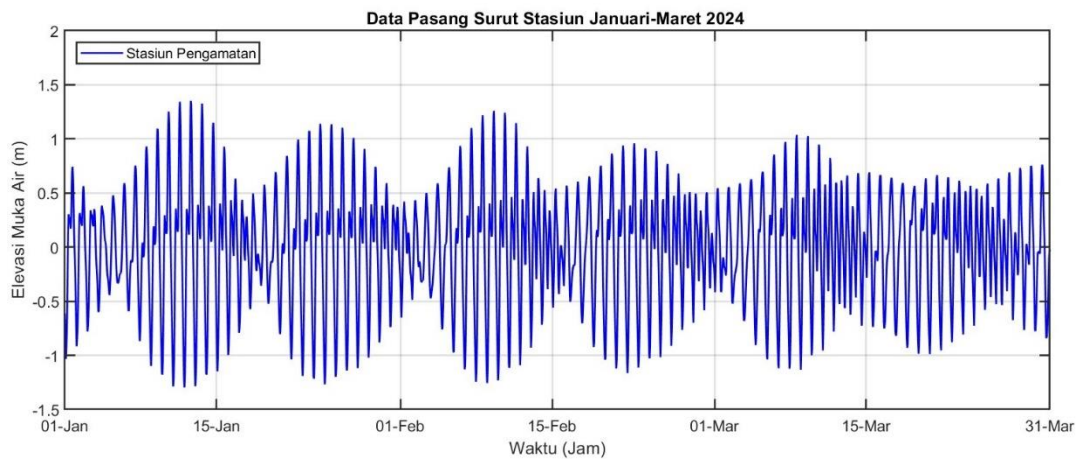
<i>Store Map Results</i>	
<i>Start time</i>	26 12 2023 00 00 00
<i>Stop time</i>	31 12 2024 23 00 00
<i>Interval</i>	60 menit
<i>Restart interval</i>	1440 menit

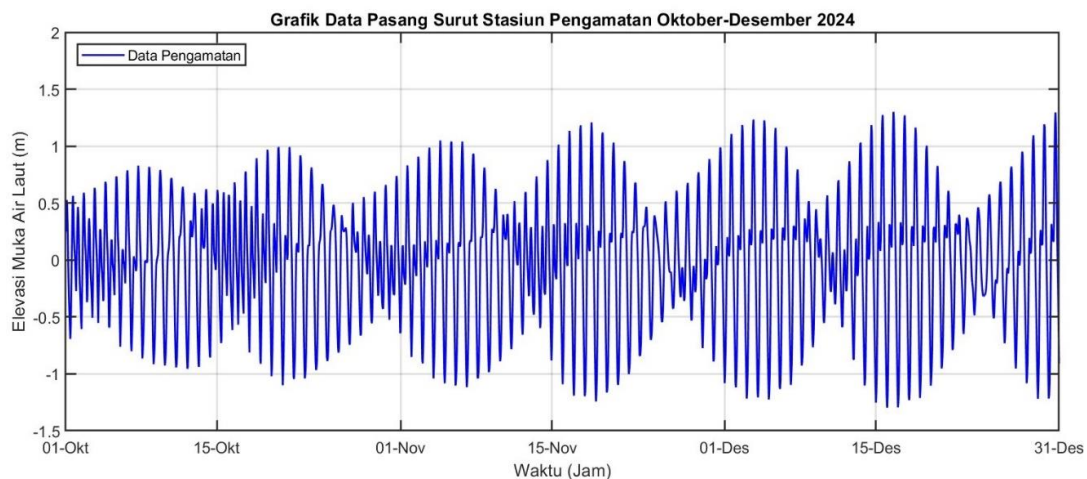
Setelah semua dilakukan, simpan file dalam bentuk *.MDF* serta pada menu *start* lakukan simulasi model.

iv. Validasi Model

Pada penelitian ini akan dilakukan validasi hasil model hidrodinamika dengan membandingkan antara data *time series* tahun 2024 per-jam dari model dan data hasil pengamatan oleh stasiun pengamatan pasang surut pada titik yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk data stasiun berada pada 7° 12' 0.216" LS dan 112° 44' 26.160" BT yang bertepatan dengan data *time series* model pada grid 206x256.

Data stasiun yang digunakan yaitu data pengamatan pasang surut selama satu tahun selama tahun 2024 mulai dari 01 Januari 2024 sampai 31 Desember 2024 yang dirincikan pada Gambar 3.11 yang mana terbagai atas 4 gambar yaitu Gambar 3.11a data pasang surut bulan Januari-Maret, Gambar 3.11b Data bulan April-Juni, Gambar 3.11c data bulan Juli-September, dan Gambar 3.11d data bulan Oktober-Desember. Data pada keempat gambar tersebut merupakan data *time series* per-jam dengan total jumlah data sebanyak 8784 sesuai dengan jumlah jam dalam tahun 2024.





(d)

Gambar 3.11 Grafik data pasang surut stasiun Tanjung Perak 2024 (a) Data bulan Januari- Maret (b) Data bulan April-Juni (c) Data bulan Juli-September (d) Data bulan Oktober-Desember

Metode validasi yang digunakan yaitu menggunakan salah satu *cost function* yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) pada Persamaan 2.15. Validasi menggunakan RMSE dikarenakan bahwa nilai RMSE merupakan gap rata-rata dari model dengan keadaan aslinya yang satuannya sesuai dengan satuan data yang divalidasi. Seperti yang diketahui bahwa model bukan hanya untuk mengetahui korelasi antara model dengan kondisi aslinya tetapi untuk menggambarkan sedekat mungkin dengan kondisi aslinya sehingga validasi dengan RMSE sangat cocok dalam validasi model yang tidak hanya menggambarkan korelasi namun gap rata-rata antara model dengan keadaan aslinya.

Pada teorinya bahwa ketika nilai RMSE kurang dari satu dapat dianggap baik tetapi pada beberapa jurnal nilai RMSE bervariasi untuk pemodelan. Pada salah satu jurnal pemodelan hidrodinamika menyatakan nilai RMSE yaitu kurang dari 0,3 meter dapat dianggap baik, berikut untuk lebih jelasnya pada Table 3.13 (Khotimah 2012 dalam Froditus, 2018).

Tabel 3.12 Klasifikasi tingkat kesalahan RMSE (Khotimah 2012 dalam Froditus, 2018)

Nilai RMSE (meter)	Tingkat Kesalahan
0,00 – 0,299	Kecil
0,30 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,899	Besar
> 0,90	Sangat Besar

Selain RMSE, validasi juga dilakukan terhadap fase dari pasang surut tersebut. Validasi ini dilakukan secara visual dengan cara membandingkan titik puncak pasang surut model dengan pengamatan melalui grafik pasang surut. Jika fase pasang surut antar data model dan data pengamatan sama atau sejajar secara grafis maka model dapat dikatakan tervalidasi.

Setelah model tervalidasi dengan nilai RMSE dibawah 0.3 meter serta dengan pola fase yang sama maka dilakukan pengekstrakan model. Jika belum tervalidasi maka model akan dilakukan proses simulasi ulang dengan menambah *boundary condition* pada parameter pasang surut atau mengecek ulang data parameter angin yang di-input.

3.3.3 Pengolahan Data Model Hidrodinamika

Pada tahap ini akan dilakukan ekstraksi data model sehingga didapatkan data yang akan digunakan sebagai data lanjutan untuk membuat peta pasang surut dan model separasi.

i. Pengambilan Data *Time Series* Tinggi Air Per-satuan Waktu

Data *water level* didapatkan dari hasil pemodelan sesuai dengan titik titik yang telah ditentukan sebelum dilakukan simulasi model. Data *water level* yang didapatkan perjam selama satu tahun yang dijadikan sebagai data pasang surut. Pengambilan data tersebut menggunakan perangkat lunak matlab dengan *package Earthtools*. Data pasang surut tersebut selanjutnya dilakukan perhitungan menggunakan menggunakan metode *least square* melalui program *t-tide* pada perangkat lunak Matlab untuk didapatkan nilai dari parameter konstanta pasang surut amplitudo dalam meter dan fase dalam sudut derajat.

ii. Pembuatan Peta Pasang Surut

Peta pasang surut yang akan dibuat yaitu peta *co-range* dari empat parameter pasang surut utama yaitu M2, S2, O1 dan K1. Selain itu juga dilakukan pembuatan peta karakteristik pasang surut pada area penelitian berdasarkan nilai fromzhal yang didapatkan melalui interpolasi. Perangkat lunak yang akan digunakan yaitu ArcGIS.

Pembanguna peta tipe pasang surut menggunakan data amplitudo dari empat konstanta K1, O1, S2, dan M2 yang dilakukan perhitungan menggunakan persamaan fromzhal pada Persamaan 2.9 dengan menggunakan amplitudo empat variable pasang surut utama. Perhitungan dilakukan pada setiap titik yang sudah ada sehingga didapatkan nilai fromzhal yang harus diklasifikasikan dalam empat tipe pasang surut pada Tabel 2.4 yang terdiri dari empat jenis tipe pasang surut yaitu jika $F \leq 0,25$ maka akan termasuk dalam tipe semidiurnal, $0,25 < F \leq 1,5$ akan termasuk dalam tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal, $1,5 < F \leq 3,0$ termasuk dalam tipe campuran dominan diurnal, dan terakhir diurnal dengan nilai fromzhal $F > 3,0$. Data nilai fromzhal tersebut dilakukan interpolasi yang diatur dengan empat klasifikasi warna menyesuaikan dengan tipe pasang surutnya. Serta interpolasi lainnya akan diatur dengan rentang nilai 0.25 agar dapat diketahui secara lebih detail variasi tipe pasang surut di Selat Madura Bagian Barat.

3.3.4 Tahap Akhir

Analisis hasil pemodelan hidrodinamika melalui nilai RMSE untuk mengetahui seberapa dekat model dengan kenyataan sesuai dari data pengamatan stasiun pasang surut. Selanjutnya dilakukan analisis terkait peta *co-phase* untuk mengetahui pergerakan gelombang dan *co-amplitude* untuk mengetahui besar perambatan gelombang pasang surut pada area penelitian. Terakhir merupakan tujuan utama yaitu untuk menganalisis tipe peta pasang surut air laut pada area penelitian secara spasial terhadap peta *co-*

amplitude untuk mengetahui parameter harmonik pasang surut mana yang berpengaruh pada variabilitas tipe pasang surut pada area penelitian.

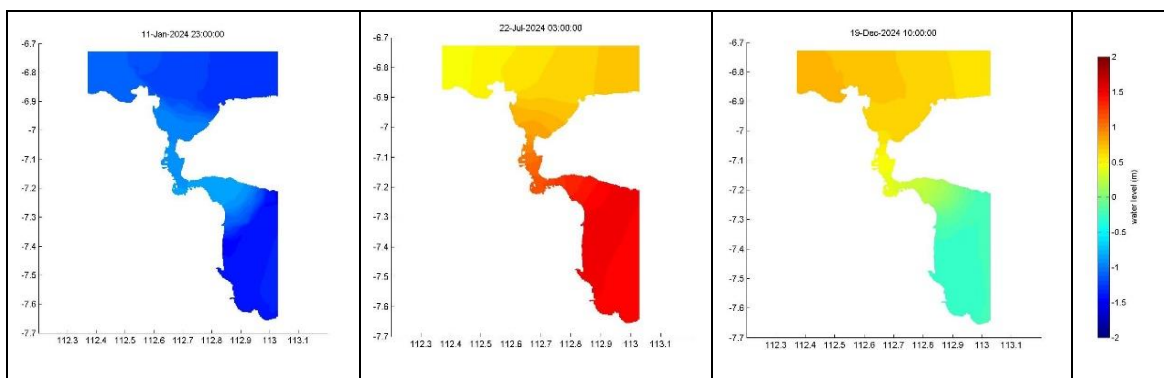
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan secara rinci hasil dari pemodelan hidrodinamika hingga analisis terkait hasil variabilitas tipe pasang surut secara spasial pada area penelitian di Selat Madura Bagian Barat.

4.1 Hasil Model Hidrodinamika

Pada penelitian ini dibangun model hidrodinamika menggunakan perangkat lunak Delft3D dengan hanya menggunakan satu modul yaitu modul *flow*. Model hidrodinamika dari modul *flow* tersebut menghasilkan model hidrodinamika pasang surut melalui data *time series water level* persatuan jam. Model yang dihasilkan dari hanya dua parameter penggerak pasang surut yaitu parameter penggerak angin dan kostranta pasang surut pada area *boundary* model. Didapatkan data model selama tahun 2024 dengan waktu inisiasi selama 5 hari dengan dengan total *time series* sebanyak 8904 yang dengan rentan data per-jam. Luas hasil model yaitu seluas 2.750,76 km persegi dengan jumlah total grid yaitu 68769 grid dengan batas secara persegi dengan daratan yaitu lintang 6°31'42.45" LS - 7°54'5.90"LS dengan bujur 112°13'53.89" BT - 113°10'21.29" BT.

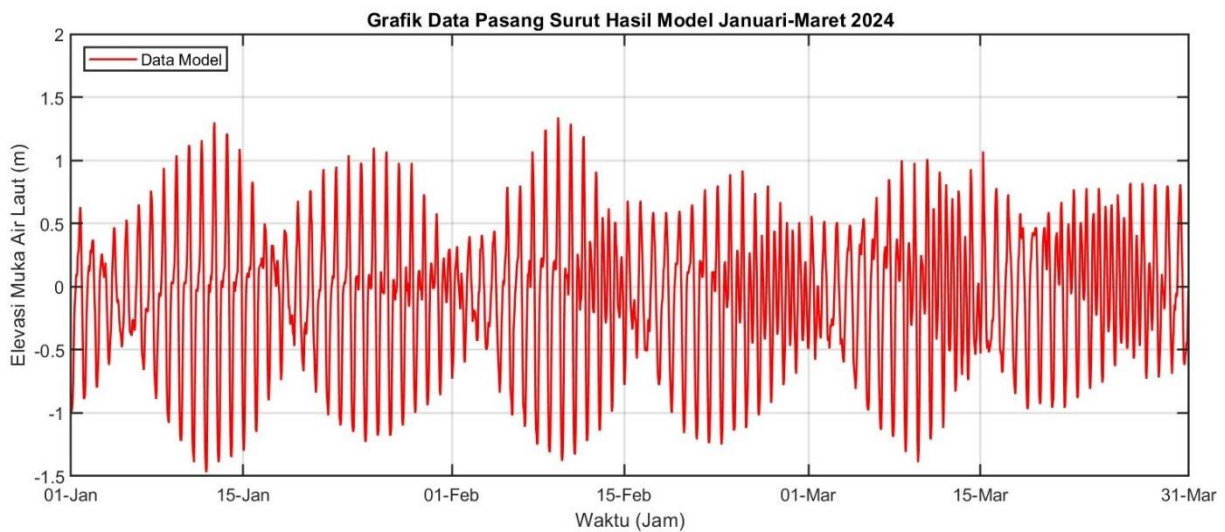
Pada Gambar 4.1 merupakan contoh hasil tinggi air model dalam tiga waktu yaitu pada awal tahun 11 januari 2024 jam 23, pertengahan tahun 22 juli 2024 jam 00, dan terakhir pada 19 desember 2024 jam 10. Pada 11 januari 2024 jam 23 memperlihatkan kondisi surut, ditandai dengan nilai muka air negatif (warna biru) yang relatif merata di hampir seluruh wilayah, menunjukkan dominasi penurunan muka air laut. Pada 22 juli 2024 jam 00 menunjukkan kondisi pasang maksimum, dengan elevasi muka air positif tinggi (warna merah-oranye) terutama di bagian selatan domain, yang mengindikasikan akumulasi massa air akibat propagasi gelombang pasang dari batas terbuka menuju perairan yang lebih sempit. Pada 19 desember 2024 jam 10 merepresentasikan kondisi peralihan (menuju surut), di mana elevasi muka air berada pada nilai menengah (hijau–kuning), menandakan proses pelepasan massa air dari wilayah selat menuju laut terbuka. Dari ketiga kondisi air tersebut menyatakan bahwa selama awal, pertengan, dan akhir tahun model tidak memiliki kondisi *blow up*, atau dapat dikatakan bahwa secara visual model tidak memiliki kondisi ketidakseimbangan numerik atau fisik.



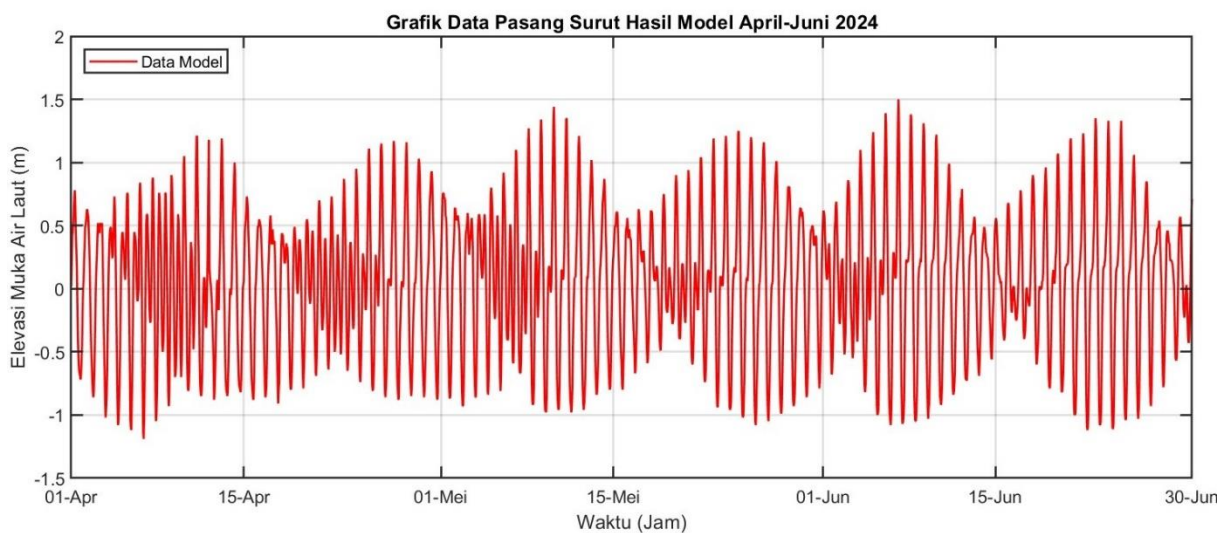
Gambar 4.1 Beberapa visualisasi hasil model hidrodinamika pasang surut.

Setelah model dapat disimpulkan dalam keadaan yang baik maka akan dilakukan validasi untuk mengetahui keakuratan model. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada bab metodeologi bagian monitoring. Bahwa pada grid nomor 206x256 bertepatan

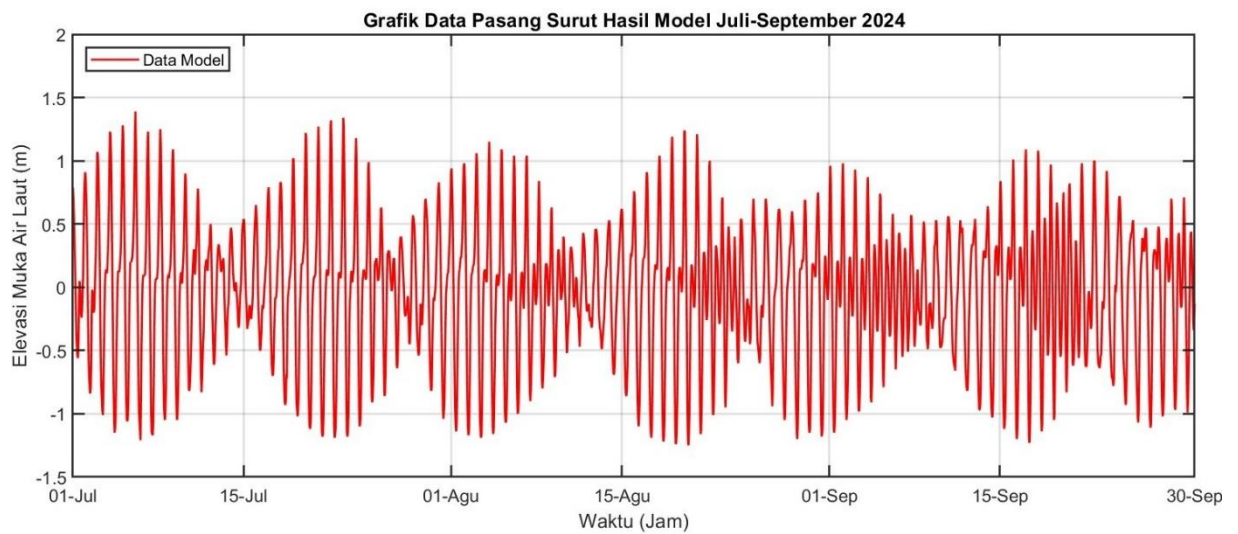
dengan posisi palem pasang surut miliki BIG yaitu pada koordinat $7^{\circ} 12' 0.216''$ LS dan $112^{\circ} 44' 26.160''$ BT merupakan data yang akan digunakan untuk melakukan validasi keakuratan model hidrodinamika. Pada sampel data pada grid 206×256 secara keseluruhan sebanyak 8784 data *time series* tinggi air perjam digambarkan dalam grafik pada Gambar 4.2 yang terbagi atas empat gambar per-tiga bulan. Gambar 4.12a grafik data pasang surut model bulan Januari-Maret dengan grafik yang baik tanpa kecacatan data, Gambar 4.12b data bulan April-Juni sama halnya dengan grafik sebelumnya memiliki grafik yang baik tanpa kecacatan data, Gambar 4.12c data bulan Juli-September juga memiliki grafik yang baik tanpa kecacatan data, dan terakhir Gambar 4.12d data bulan Oktober-Desember memiliki grafik yang baik tanpa kecacatan data.



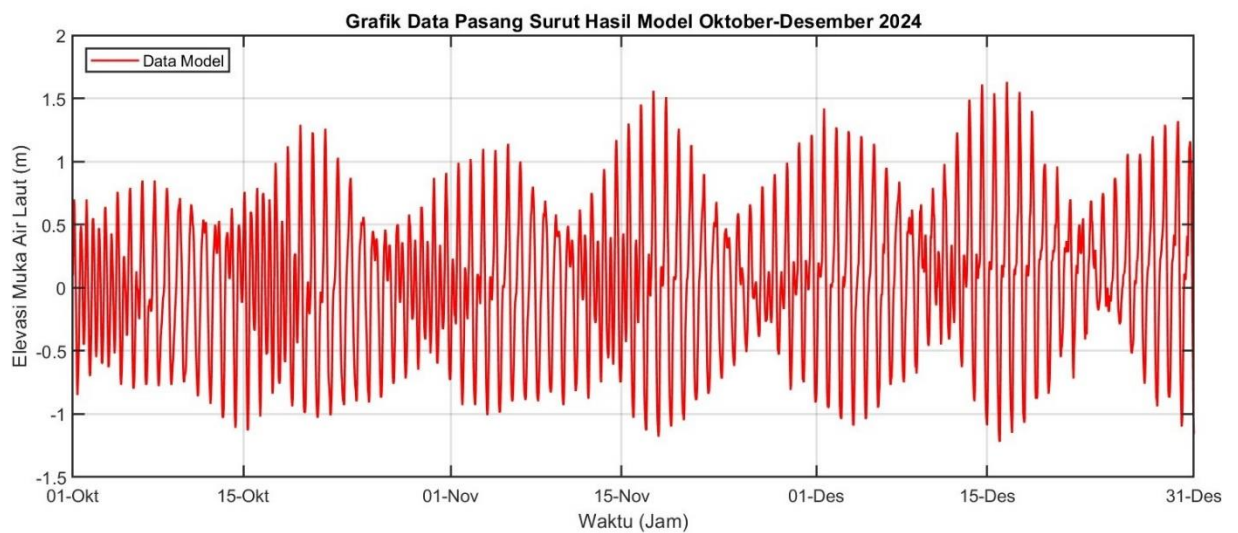
(a)



(b)



(c)

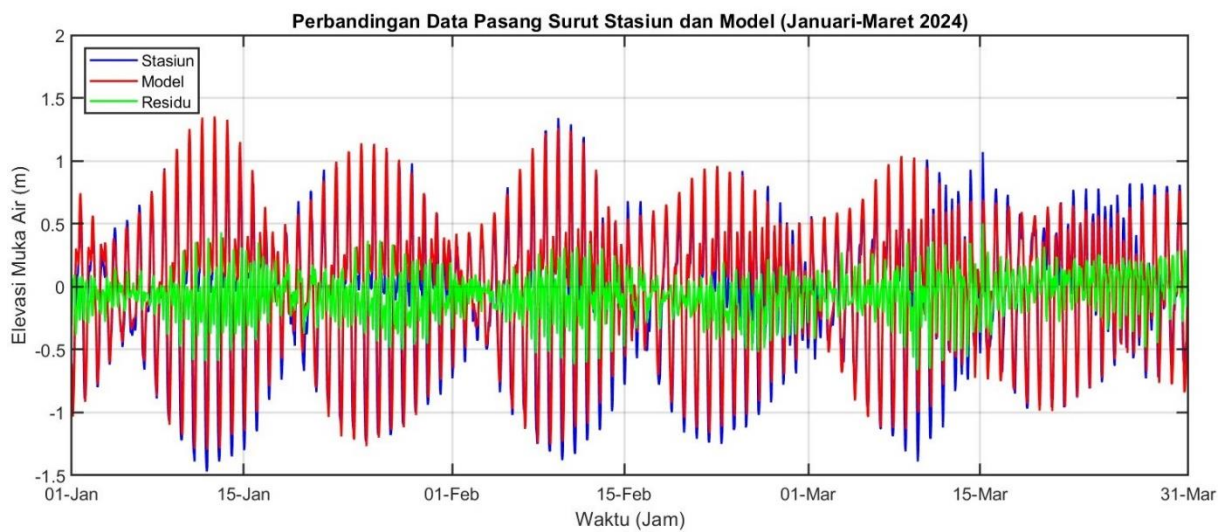


(d)

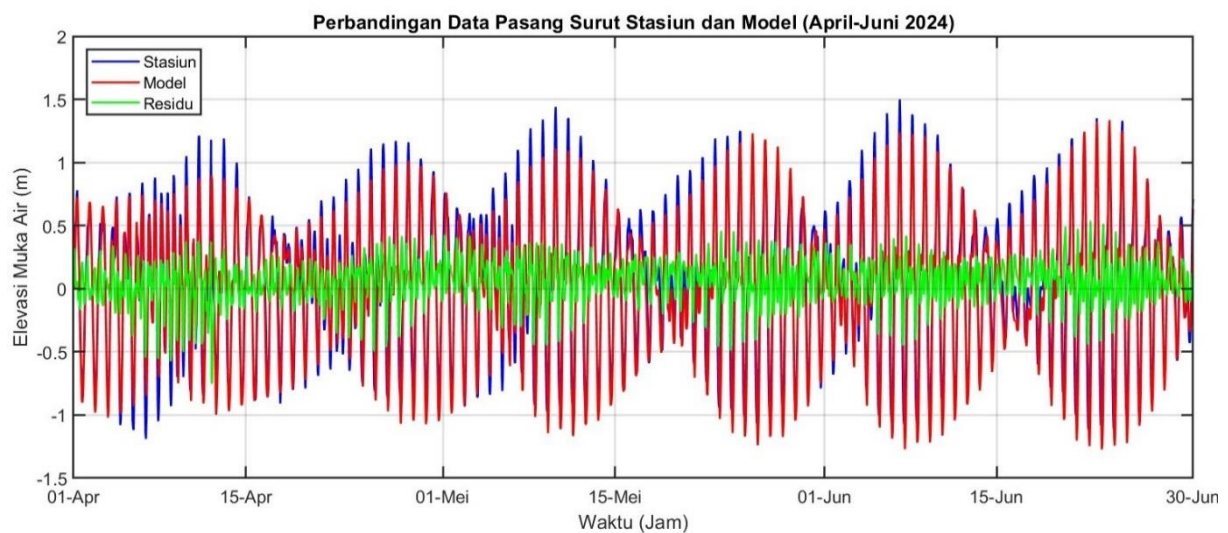
Gambar 4.2 Grafik data pasang surut model pada grid 206x256 sebagai data validasi model (a) Data bulan Januari- Maret (b) Data bulan April-Juni (c) Data bulan Juli-September (d) Data bulan Oktober-Desember

Data hasil model dan data pengamatan terlebih dahulu analisis kuantitatif dengan dilakukan plot untuk mengetahui apakah fase dan pola periodik kedua data sama. Hal tersebut penting untuk mengetahui apakah model dengan dengan hasil pengamatan atau data aktualnya memiliki fase yang sama. Plot data antara data pasang surut model pada grid 206x256 dengan data pasang surut stasiun pengamatan BIG Tanjung Perak Surabaya seperti pada Gambar 4.3 yang terbagi atas empat gambar. Gambar 4.3a merupakan grafik data perbandingan antara data obeservasi yang berwarna biru dengan data model yang berwarna merah berserta residu atau selisih data per-unit yang berwarna hijau pada bulan Januari-Maret. Pada gambar tersebut antara grafik model dan data observasi stasiun memiliki fase dan pola periodik yang sama dengan residu berkisar 0 – 0,66 meter, rata-rata residu 0,06

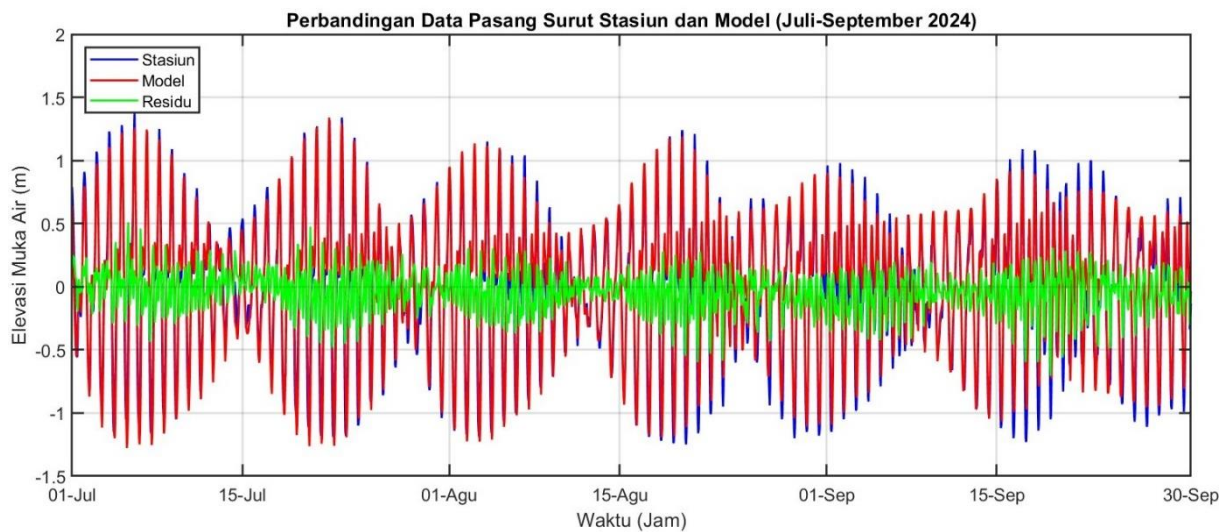
meter dan standar deviasi 0,17 meter. Sedangkan Gambar 4.3b data bulan April-Juni memiliki grafik model dan data observasi stasiun memiliki fase dan pola periodik yang sama dengan residu yang berkisar 0-0,75 meter dengan rata-rata residu 0,05 meter dan standar deviasi 0,16 meter, Gambar 4.3c data bulan Juli-September memiliki grafik model dan data observasi stasiun memiliki fase dan pola periodik yang sama dengan residu yang berkisar 0-0,7 meter dengan rata-rata residu 0,03 meter dan standar deviasi 0,15 meter. Terakhir Gambar 4.3d data bulan Oktober-Desember memiliki grafik model dan data observasi stasiun memiliki fase dan pola periodik yang sama dengan residu yang berkisar 0 sampai 0,73 meter dengan rata-rata residu 0,04 meter dan standar deviasi 0,19 meter. Berdasarkan keempat gambar tersebut dapat menunjukkan bahwa fase antara kedua data dalam fase yang sama.



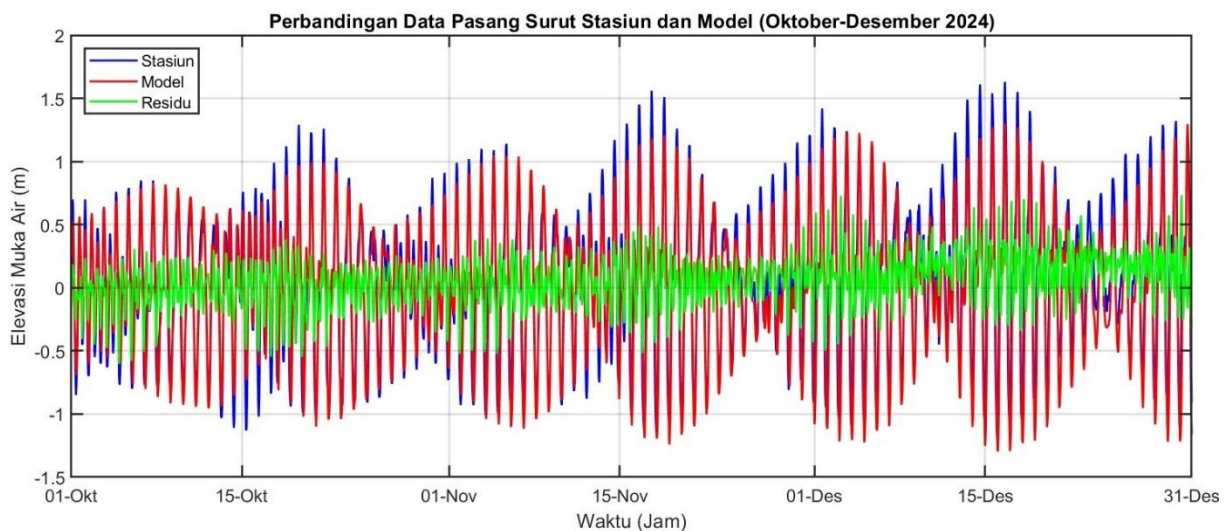
(a)



(b)



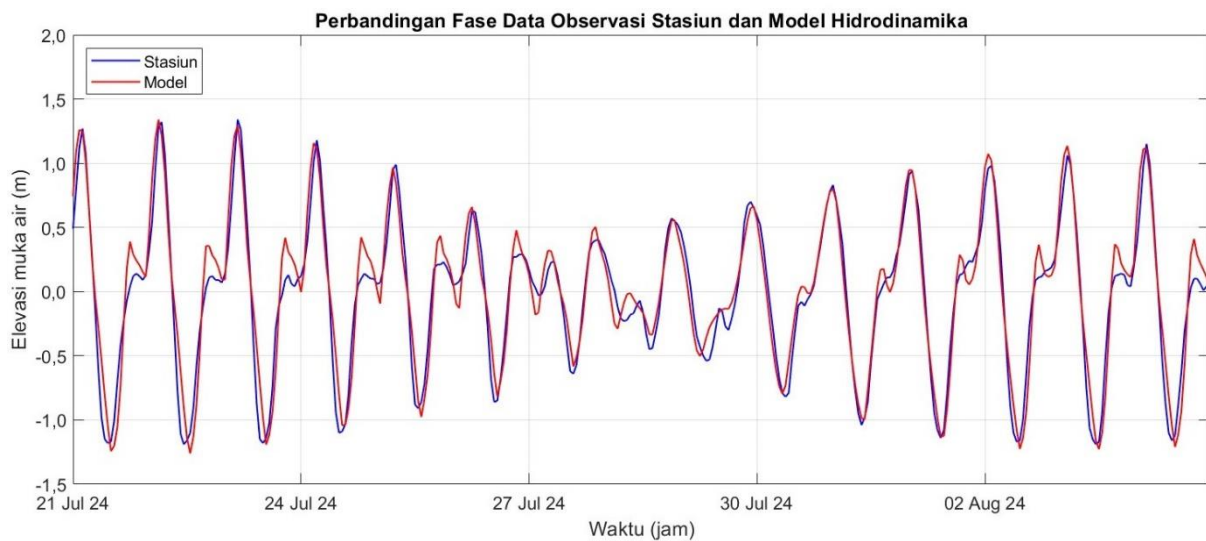
(c)



(d)

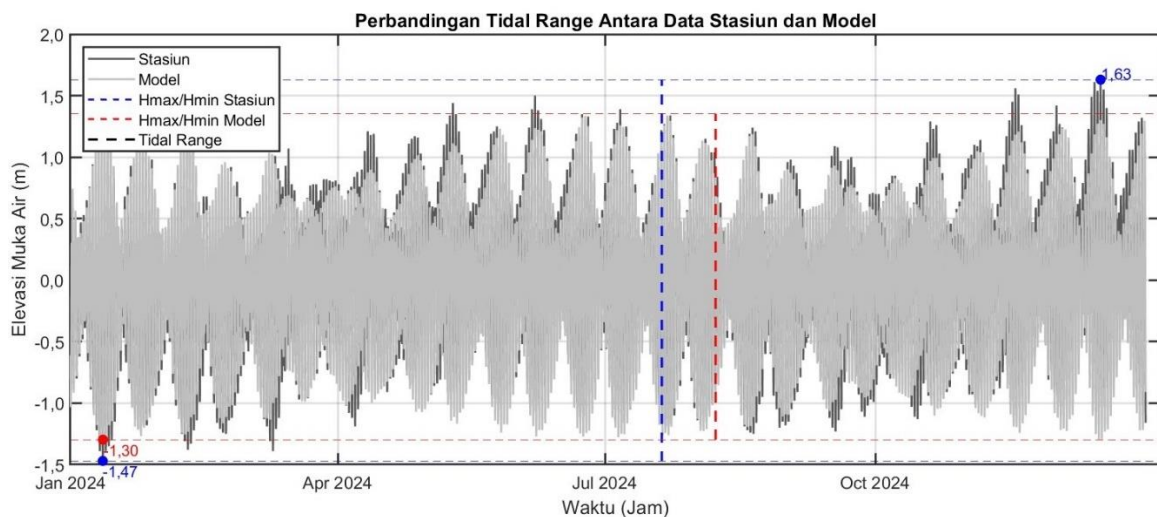
Gambar 4.3 Grafik perbandingan antara data model dan stasiun observasi (a) Data bulan Januari- Maret (b) Data bulan April-Juni (c) Data bulan Juli-September (d) Data bulan Oktober-Desember

Namun untuk lebih detailnya akan dilakukan plot antara kedua data dalam rentan waktu yang pendek agar fase antara kedua data pasang surut dapat terlihat lebih jelas. Data yang digunakan yaitu data dalam rentan 15 hari pada tanggal 21 Juli 2024 jam 00 sampai 4 Agustus 2024 jam 23 seperti pada Gambar 4.4. Berdasarkan visualisasi tersebut terlihat jelas bahwa fase kedua grafik pada fase yang sama dengan sedikit perbedaan yang dapat ditoleransi serta terdapat perbedaan pada tinggi air pada beberapa waktu yang diakibatkan oleh data observasi yang lebih kompleks dibandingkan data model.



Gambar 4.4 Visualisasi perbandingan antara pasang surut model dengan pengamatan

Setelah sampel data memiliki fase pasang yang sama antara hasil model dengan data pengamatan dari stasiun pasang surut Tanjung Perak selanjutnya dilakukan uji RMSE untuk mengetahui seberapa dekat hasil model hidrodinamika dengan kondisi aktual dari data stasiun pengamatan pasang surut tersebut. Seperti yang diketahui bahwa dari sampel data yang lebih jelas tersebut, dapat diketahui bahwa model memiliki fase dan pola periodik yang sama dengan keadaan aktualnya, namun seperti pada grafik terdapat perbedaan tinggi tertinggi air antara model dengan kondisi aktualnya, dimana garis grafik berwarna biru memiliki tinggi air yang lebih tinggi dibandingkan garis berwarna merah yang merupakan data hasil model hidrodinamika.



Gambar 4.7 *Tidal Range* antara model dengan data observasi stasiun.

Selain itu, untuk mengetahui seberapa dekat model dengan aslinya, dilakukan penentuan perbedaan *tidal range* untuk menentukan seberapa perbedaan antara tinggi maksimum saat pasang serta tinggi minimum saat surut kedua data. Pada Gambar 4.7 melihat bahwa untuk model memiliki tinggi maksimum pada nilai 1,35 meter dengan nilai tinggi minimum -1.30 meter. Sedangkan untuk observasi stasiun memiliki tinggi maksimum pada

nilai 1,63 meter dengan nilai tinggi minimum -1,47 meter. Sehingga nilai *tidal range* model 2,6 meter dan *tidal range* data observasi stasiun 2 meter dengan perbedaan 0,4 meter. Hal tersebut masih termasuk dalam toleransi.

Hasil validasi kuantitatif antara data observasi dan hasil pemodelan pasang surut yang dihitung menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) berdasarkan Persamaan 2.15 menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,1802 meter. Mengacu pada kriteria penilaian kesalahan yang dikemukakan oleh Khotimah (2012) dalam Froditus (2018), nilai RMSE tersebut tergolong kecil dan masih berada dalam batas toleransi, sehingga menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil model dan data observasi. Selain itu, apabila ditinjau dari rentang variasi elevasi muka air laut pada periode pengamatan, yang berkisar antara -0,3 meter hingga sekitar 2,5 meter, maka besarnya nilai RMSE yang diperoleh relatif kecil dibandingkan dengan amplitudo pasang surut yang terjadi. Hal ini mengindikasikan bahwa penyimpangan antara model dan observasi tidak signifikan secara proporsional, sehingga model pasang surut yang digunakan dapat dinyatakan cukup andal dan layak digunakan untuk analisis lanjutan di wilayah penelitian.

4.2 Ekstrak Nilai Pasang Surut Dari Model

Pada tahap ini dilakukan ekstraksi data *time series* dari titik-titik (*observation point*) yang sudah ditentukan yang mana jarak antara titik maksimal dua kilometer atau dalam 10 grid mengikuti teori bahwa dalam dua kilometer memiliki keadaan resonansi pasang surut yang sama (Pugh dan Woodworth, 2014). Data tersebut tersimpan dalam hasil model *.trih yang mana dilakukan pengestrakan menggunakan program pada Matlab menggunakan *package EarthTools* sehingga didapatkan data *time series* seperti pada Tabel 4.2 yang mana terdiri dari data *time series* tinggi muka air per-jam pada setiap titik dengan jumlah 439 titik.

Tabel 4.1 Data hasil model berupa data *time series water level* setiap titik

No	Lintang (°)	Bujur (°)	Waktu/ Tinggi Air (m)				
			01-Jan-2024 00:00:00	01-Jan-2024 01:00:00	01-Jan-2024 02:00:00	01-Jan-2024 03:00:00	01-Jan-2024 04:00:00
1	-7,651	112,995	-0,992	-0,819	-0,546	-0,234	0,048
2	-7,637	112,968	-0,992	-0,817	-0,543	-0,230	0,051
3	-7,633	113,026	-0,982	-0,818	-0,554	-0,249	0,028
4	-7,613	112,898	-0,996	-0,820	-0,544	-0,229	0,054
5	-7,613	112,952	-0,992	-0,817	-0,542	-0,229	0,052
6	-7,611	112,997	-0,991	-0,818	-0,544	-0,231	0,050
7	-7,606	112,889	-0,996	-0,821	-0,544	-0,229	0,054
8	-7,592	112,903	-0,996	-0,821	-0,544	-0,230	0,054
9	-7,584	112,921	-0,995	-0,820	-0,544	-0,230	0,053
10	-7,579	112,873	-0,997	-0,821	-0,545	-0,230	0,054
11	-7,577	112,900	-0,996	-0,821	-0,545	-0,230	0,053
12	-7,577	112,988	-0,988	-0,814	-0,541	-0,230	0,050
13	-7,575	113,026	-0,982	-0,809	-0,537	-0,228	0,049
14	-7,565	112,905	-0,997	-0,822	-0,546	-0,231	0,053
15	-7,563	112,954	-0,991	-0,817	-0,542	-0,230	0,051
16	-7,561	112,878	-1,000	-0,825	-0,548	-0,231	0,054

17	-7,559	112,898	-0,999	-0,823	-0,547	-0,231	0,053
18	-7,532	112,878	-1,006	-0,831	-0,553	-0,235	0,052
19	-7,532	112,903	-1,003	-0,829	-0,552	-0,235	0,051
....							
437	-6,729	112,882	-0,780	-1,012	-1,119	-1,081	-0,899
438	-6,729	112,957	-0,822	-1,042	-1,131	-1,069	-0,865
439	-6,729	113,026	-0,852	-1,062	-1,135	-1,055	-0,836

Seluruh data *time series* tinggi muka air pada 439 dilakukan perhitungan menggunakan program *t-tide* untuk mendapatkan konstanta pasang surut setiap titik. Pada penelitian ini hanya empat konstanta yang digunakan K1, O1, M2, dan S2. Contoh datanya yaitu pada Tabel 4.4 yang merupakan hasil nilai fase dalam derajat dari empat konstanta tersebut dan Tabel 4.3 merupakan nilai amplitudo dalam satuan meter.

Tabel 4.2 Amplitudo konstanta harmonik pasang surut hasil pengolahan menggunakan *t-tide*

No Titik	Lintang (°)	Bujur (°)	Amplitudo (meter)			
			K1	O1	M2	S2
1	-7,6510	112,9953	0,4086	0,2624	0,4727	0,3479
2	-7,6366	112,9682	0,4085	0,2626	0,4736	0,3485
3	-7,6330	113,0259	0,4077	0,2614	0,4627	0,3421
4	-7,6132	112,8980	0,4093	0,2633	0,4769	0,3511
5	-7,6132	112,9520	0,4086	0,2627	0,4742	0,3490
6	-7,6114	112,9971	0,4080	0,2623	0,4720	0,3470
7	-7,6060	112,8890	0,4094	0,2633	0,4771	0,3512
8	-7,5916	112,9034	0,4093	0,2633	0,4769	0,3511
9	-7,5844	112,9214	0,4092	0,2632	0,4763	0,3506
10	-7,5790	112,8727	0,4095	0,2634	0,4774	0,3515
11	-7,5772	112,8998	0,4094	0,2633	0,4771	0,3513
12	-7,5772	112,9881	0,4078	0,2624	0,4712	0,3466
13	-7,5754	113,0259	0,4068	0,2617	0,4675	0,3436
14	-7,5645	112,9052	0,4096	0,2634	0,4773	0,3514
15	-7,5627	112,9538	0,4084	0,2627	0,4733	0,3482
16	-7,5609	112,8782	0,4102	0,2638	0,4792	0,3529
17	-7,5591	112,8980	0,4099	0,2636	0,4782	0,3521
18	-7,5321	112,8782	0,4110	0,2643	0,4815	0,3546
....						
637	-6,7285	112,8818	0,4819	0,2405	0,3167	0,1262
638	-6,7285	112,9574	0,4815	0,2410	0,3185	0,1282
639	-6,7285	113,0259	0,4806	0,2420	0,3205	0,1303

Tabel 4.3 Data fase konstanta harmonik pasang surut hasil pengolahan menggunakan tide.

No Titik	Lintang (°)	Bujur (°)	Fase (°)			
			K1	O1	M2	S2
1	-7,651	112,995	182,356	160,850	71,784	104,747
2	-7,637	112,968	182,310	160,847	71,473	104,620
3	-7,633	113,026	182,608	160,747	72,873	104,904
4	-7,613	112,898	182,352	160,910	71,415	104,698
5	-7,613	112,952	182,281	160,840	71,290	104,539
6	-7,611	112,997	182,255	160,802	71,385	104,582
7	-7,606	112,889	182,355	160,913	71,424	104,709
8	-7,592	112,903	182,355	160,914	71,419	104,703
9	-7,584	112,921	182,345	160,904	71,393	104,678
10	-7,579	112,873	182,356	160,914	71,433	104,719
11	-7,577	112,900	182,358	160,916	71,431	104,717
12	-7,577	112,988	182,254	160,830	71,126	104,434
13	-7,575	113,026	182,157	160,766	70,843	104,248
14	-7,565	112,905	182,363	160,909	71,455	104,748
15	-7,563	112,954	182,280	160,849	71,216	104,509
16	-7,561	112,878	182,395	160,935	71,571	104,868
17	-7,559	112,898	182,382	160,923	71,516	104,811
18	-7,532	112,878	182,539	161,076	71,890	105,207
....						
637	-6,729	112,882	194,204	149,896	145,572	220,051
638	-6,729	112,957	193,467	149,935	138,605	217,131
639	-6,729	113,026	192,720	149,833	132,988	214,797

Untuk dijadikan sebagai peta fase dilakukan konversi dari fase dengan satuan derajat ke satuan jam. Hal tersebut dilakukan untuk memudahkan dalam interpretasi peta. Peta fase menandakan waktu air tertinggi pada wilayah tersebut berdasarkan garis konturnya. Untuk konversi dari fase dalam derajat menuju fase dalam jam dilakukan menggunakan menggunakan Persamaan 4.1 dan 4.2.

$$\text{Fase (jam)} = \frac{\text{Fase (°)}}{360°} \times T \quad (4.1)$$

Dengan 360° mewakili satu siklus penuh gelombang dan T adalah periode gelombang (dalam jam) dengan persamaan sebagai berikut.

$$T = \frac{1}{\text{Frequency (cph)}} \quad (4.2)$$

Sehingga didapatkan nilai fase dalam jam setiap titik seperti pada Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Data fase dalam jam kostanta harmonik pasang surut

No Titik	Lintang (°)	Bujur (°)	Fase (jam)			
			K1	O1	M2	S2
1	-7,651	112,995	12,124	11,536	2,477	3,492
2	-7,637	112,968	12,121	11,536	2,466	3,487
3	-7,633	113,026	12,141	11,529	2,514	3,497
4	-7,613	112,898	12,124	11,541	2,464	3,490
5	-7,613	112,952	12,119	11,535	2,460	3,485
6	-7,611	112,997	12,117	11,533	2,463	3,486
7	-7,606	112,889	12,124	11,541	2,464	3,490
8	-7,592	112,903	12,124	11,541	2,464	3,490
9	-7,584	112,921	12,123	11,540	2,463	3,489
10	-7,579	112,873	12,124	11,541	2,465	3,491
11	-7,577	112,900	12,124	11,541	2,464	3,491
12	-7,577	112,988	12,117	11,535	2,454	3,481
13	-7,575	113,026	12,111	11,530	2,444	3,475
14	-7,565	112,905	12,124	11,540	2,465	3,492
15	-7,563	112,954	12,119	11,536	2,457	3,484
16	-7,561	112,878	12,126	11,542	2,469	3,496
17	-7,559	112,898	12,126	11,541	2,467	3,494
18	-7,532	112,878	12,136	11,552	2,480	3,507
....						
637	-6,729	112,882	12,912	10,751	5,022	7,335
638	-6,729	112,957	12,863	10,753	4,782	7,238
639	-6,729	113,026	12,813	10,746	4,588	7,160

Selanjut sebagai bahan untuk membuat peta tipe pasang surut, dilakukan perhitungan nilai fromzhal menggunakan Persamaan 2.9 dengan variabel yang digunakan yaitu variabel amplitudo K1, O1, M2, dan S2. Pada Tabel 4.6 merupakan tabel hasil perhitungan nilai fromzhal setiap titik sebanyak 439 titik.

Tabel 4.5 Nilai fromzhal setiap titik.

No	Lintang (°)	Bujur (°)	Fromzhal
1	-7,651	112,995	0,818
2	-7,637	112,968	0,816
3	-7,633	113,026	0,831
4	-7,613	112,898	0,812
5	-7,613	112,952	0,815
6	-7,611	112,997	0,818
7	-7,606	112,889	0,812
8	-7,592	112,903	0,812
9	-7,584	112,921	0,813
10	-7,579	112,873	0,812
11	-7,577	112,900	0,812
12	-7,577	112,988	0,819

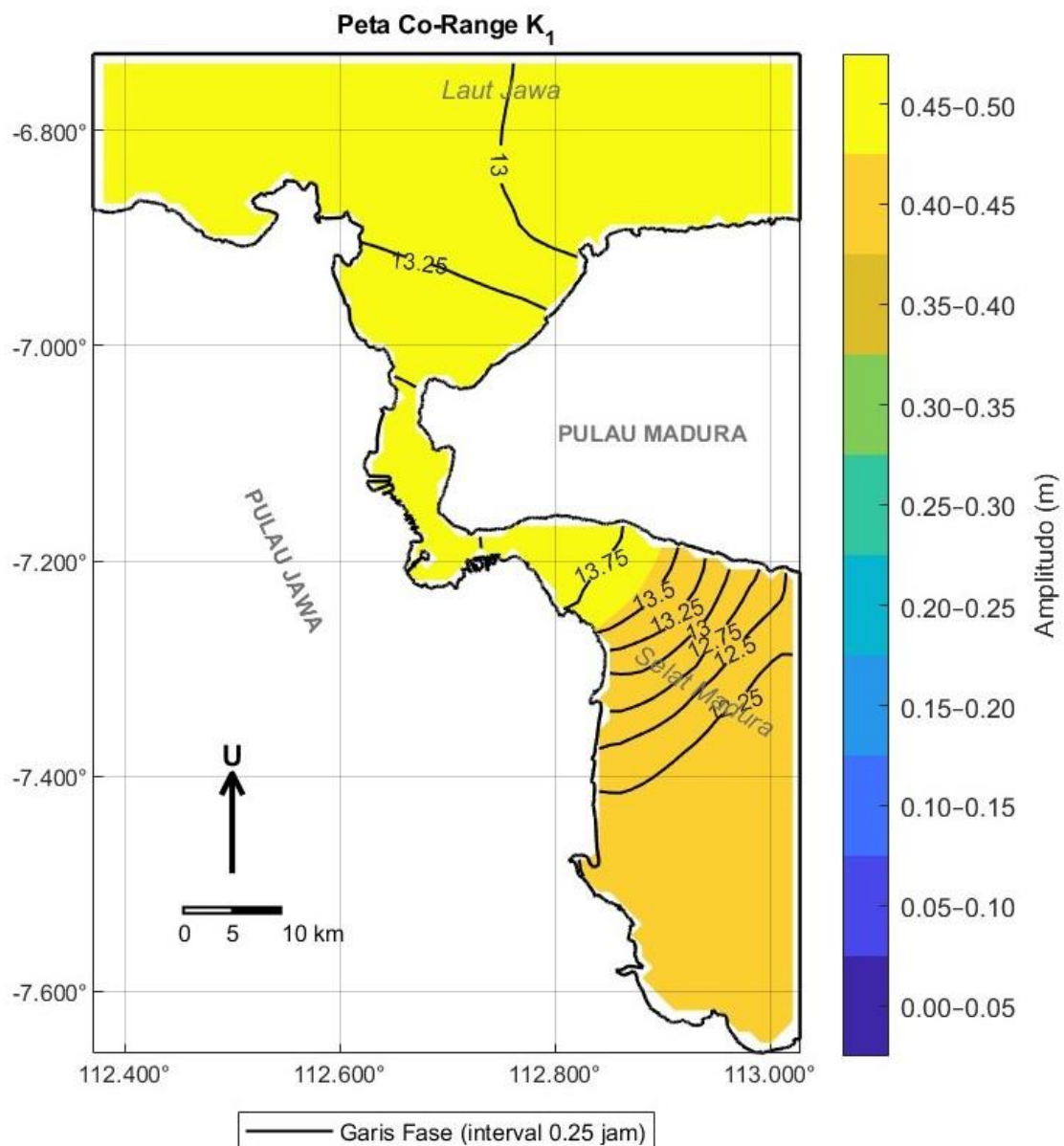
13	-7,575	113,026	0,824
14	-7,565	112,905	0,812
15	-7,563	112,954	0,817
16	-7,561	112,878	0,810
17	-7,559	112,898	0,811
18	-7,532	112,878	0,808
....			
637	-6,729	112,882	1,631
638	-6,729	112,957	1,617
639	-6,729	113,026	1,603

4.3 Peta Co-Tidal-Chart

Pembuatan peta menggunakan data hasil ekstraksi model yang dihitung menggunakan program *t-tide* sehingga didapatkan data amplitudo dan fase setiap titik. Data amplitudo dan fase dari empat konstanta harmonik pasang surut O1, K1, M2, dan S2 setiap titik dilakukan interpolasi untuk amplitudo dan serta dilakukan pembuatan kontur untuk fase yang selanjutnya dibuat dalam satu peta dengan dua lapis yang disebut sebagai peta *co-range*. Sedangkan untuk peta tipe pasang surut merupakan interpolasi dari data nilai *fromzhal* dari setiap titik. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan pada subab berikut ini.

4.3.1 Peta Co-Range K1

Berdasarkan peta *co-range* K1 pada Gambar 4.7 besar amplitudo K1 pada area penelitian kali ini yaitu berkisar antara 0,4 – 0,5 meter. Amplitudo K1 pada Laut Jawa sampai ke area sempit Selat Madura pada kisaran yang sama yaitu pada kisaran 0,4-0,45 meter. Amplitudo K1 mulai meningkat ketika berada pada area Selat Madura yang lebih luas dan dalam. Nilai amplitudo K1 relatif seragam pada area penelitian kali ini dimana pengaruh kedalaman dan penyempitan area tidak berpengaruh secara signifikan pada perubahan amplitudo K1.



Gambar 4.5 Peta *co-range* K_1 .

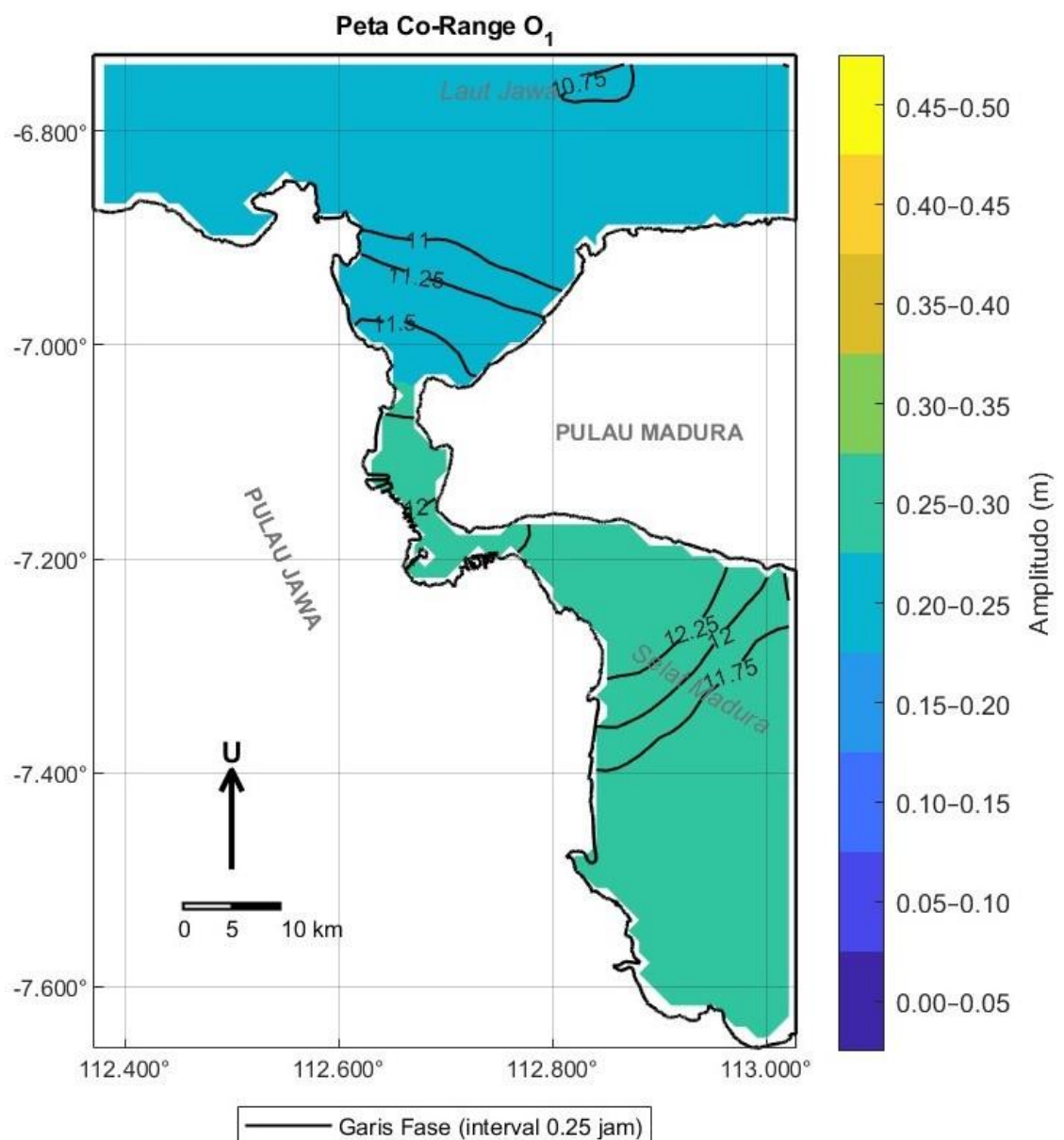
Nilai K_1 pada penelitian ini memiliki nilai yang cukup besar yang mana seperti yang diketahui bahwa komponen harmonik K_1 menjadi komponen harian (diurnal) utama atas pengaruh kombinasi gravitasi bulan dan matahari dan memiliki periode sekitar 23,93 jam. Pada persamaan fromzhal seperti pada Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa posisi K_1 sebanding dengan nilai fromzhal sehingga semakin besar nilai K_1 tipe pasang surut akan condong ke arah diurnal.

Sedangkan fase K_1 yang direpresentasikan oleh kontur pada Gambar 4.7 menunjukkan pola perambatan fase untuk konstanta harmonik K_1 . Pada konstanta harmonik K_1 arah perambatan gelombang pada penelitian ini mengarah dari dua sisi yaitu dari Laut Jawa dan arah Selat Madura bagian timur. Dari arah Selat Madura bagian timur gelombang pasang surut merambat dari 12,25 sampai ke arah penyempitan selat yaitu dengan nilai 13,75 dengan kontur yang rapat yang menandakan bahwa pada area tersebut gelombang pasang surut memiliki frekuensi yang lebih besar. Begitu juga

sebaliknya dari arah Laut Jawa perambatan fase gelombang pasang surut merambat dari jam 13 menuju area sempit selat sampai jam 13,75.

4.3.2 Peta Co-Range O_1

Komponen harmonik O_1 merupakan komponen harmonik dengan tipe konstituen pasang surut harian (diurnal) utama yang berasal terutama dari pengaruh gravitasi bulan dalam waktu 25,82 jam. Pada area penelitian kali ini pada Gambar 4.8 amplitudo O_1 berkisar dari 0,2 – 0,3 meter. Pada area sekitar Laut Jawa yang lebar dan dalam memiliki amplitudo O_1 lebih kecil dengan kisaran 0,2 – 0,25 meter dibandingkan dengan amplitudo pada area Selat Madura pada area sempit menuju arah timur dengan kisaran 0,25 - 0,30 meter. Perubahan tersebut berkemungkinan terjadi akibat dari area Selat Madura yang lebih dangkal.

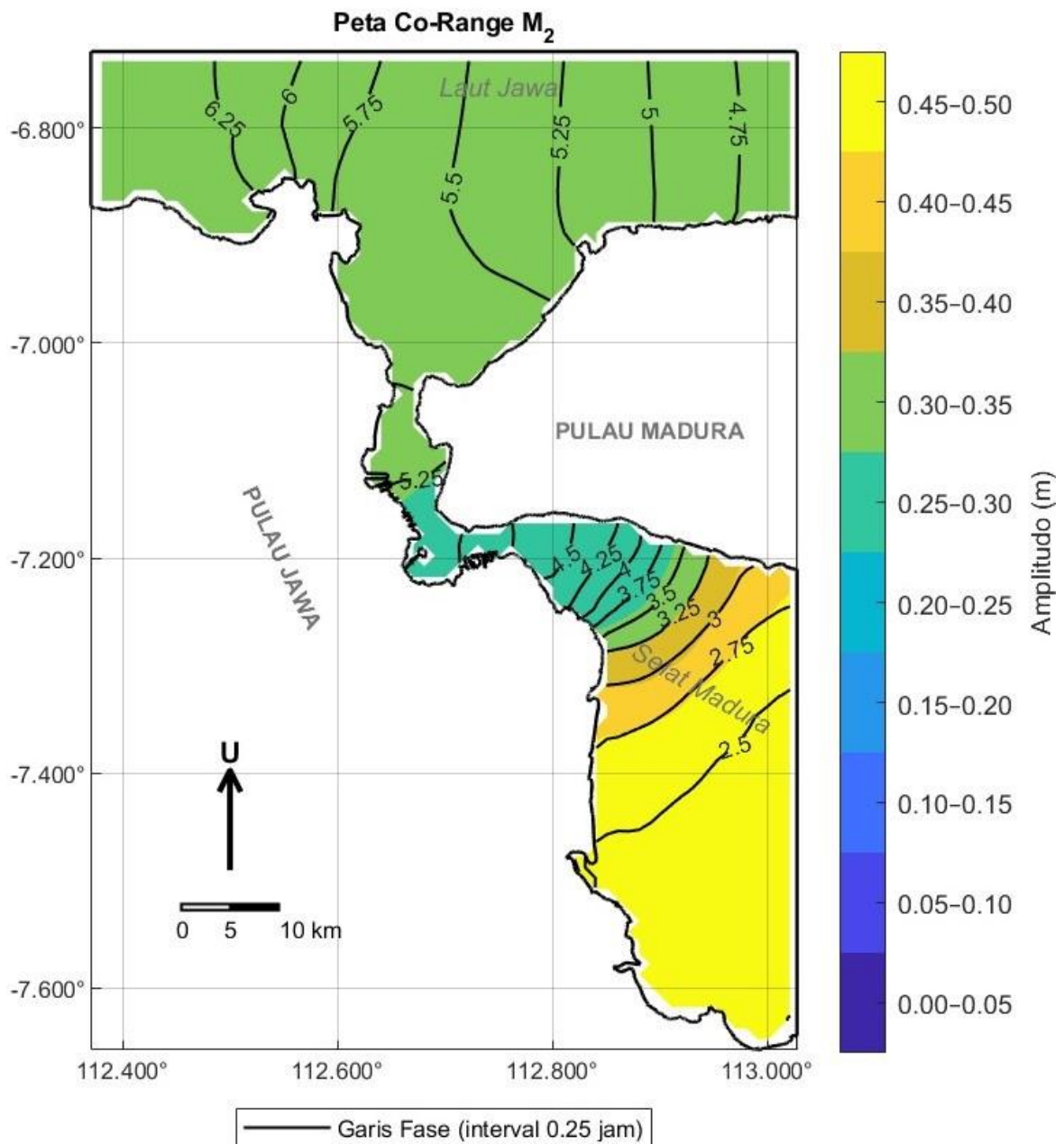


Gambar 4.6 Peta co-amplitudo O_1

Berdasarkan peta *co-range* O1 yang direpresentasikan dengan garis kontur pada Gambar 4.8 memiliki perambatan fase sama halnya dengan konstanta K1 dimana gelombang pasang surut merambat dari dua sisi yaitu dari Laut Jawa dan arah Selat Madura bagian timur. Dari arah Laut Jawa dengan nilai 10,75 hingga 12,25 yang sama halnya dengan perambatan gelombang dari Selat Madura bagian timur yaitu merambat dari fase 11,75 yang bertemu pada fase 12,25.

4.3.3 Peta Co-Amplitudo M2

Pada Gambar 4.9 menggambarkan peta untuk *co-range* M2 yang konstanta M2 merupakan tipe konstanta pasang surut semidiurnal dengan periode 12,42 jam yang digerakkan gaya tarik gravitasi bulan. Pada penelitian ini kisaran amplitudo M2 pada 0,25 – 0,50 meter. Amplitudo M2 pada Laut Jawa berkisar 0,3 – 0,35 yang selanjutnya terjadi penurunan nilai amplitudo pada sebagian area sempit selat madura. Setelah melewati area sempit Selat Madura amplitudo terus membesar hingga mencapai kisaran maksimal 0,45-0,5 meter. Perbedaan nilai amplitudo O1 yang variatif memungkinkan terjadi perbedaan tipe pasang surut pada area Selat Madura bagian barat. Terkait dengan kaitan dengan kedalaman dan penyempitan area selat dapat terlihat pengaruhnya yaitu pada Laut Jawa amplitudo M2 yang stabil namun setelah berada di Selat Madura terjadi perubahan amplitudo konstanta harmonik M2.



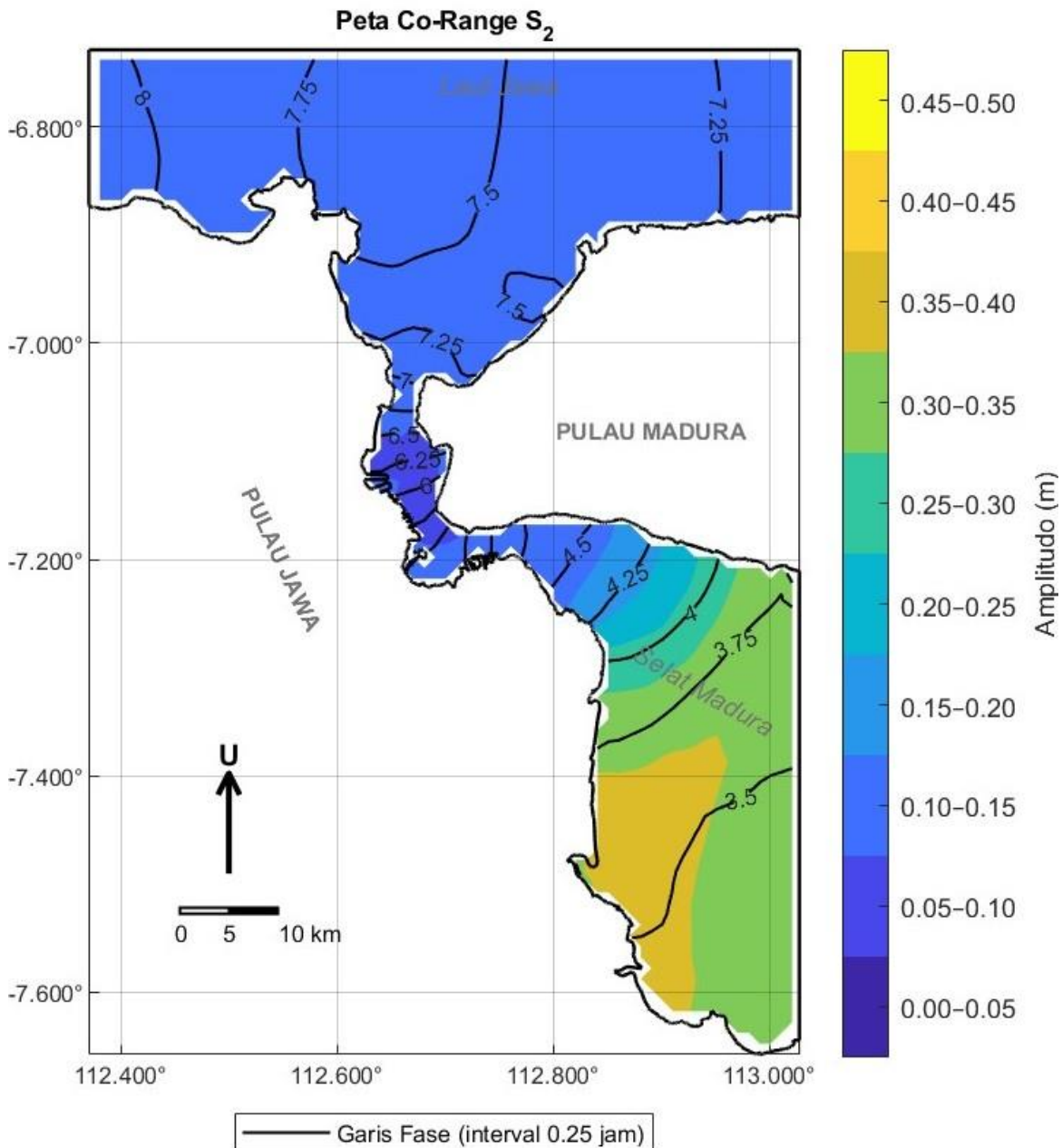
Gambar 4.7 Peta *co-range* M_2

Peta *co-range* M_2 pada Gambar 4.9 memiliki kontur yang cukup kompleks dimana perambatan pasang surut berasal dari area Selat Madura dengan nilai 2,5 menuju keluar ke arah Laut Jawa. Fase dimulai dari 2,5 sampai 4,5 dengan kontur yang rapat menandakan area tersebut memiliki frekuensi gelombang pasang surut yang besar. Setelah itu menuju ke arah Laut Jawa dari fase 4,5 sampai 6,5. Pada area Laut Jawa gelombang pasang surut mengarah ke arah barat.

4.3.4 Peta Co-Amplitudo S_2

Komponen harmonik S_2 termasuk dalam tipe harmonik semidurnal yang digerakkan oleh gaya gravitasi matahari dengan periode 12 jam. Pada Gambar 4.10 menunjukkan amplitudo S_2 memiliki kisaran nilai yaitu dari 0 – 0,40 meter. Dari Laut Jawa yang memiliki amplitudo S_2 stabil berkisar antara 0,05 – 0,1 meter memasuki area

sempit Selat Madura dengan kedalam berkisar 10 sampai 30 meter dengan lebar selat minimum sekitar 3 km amplitudo S2 mulai berubah. Perubahan nilai amplitudo S2 berubah dari Laut Jawa memiliki amplitudo S2 0,05-0,1 meter menuju Selat Madura turun menjadi kisaran 0 – 0,05 yang selajutnya naik terus hingga kisaran 0,3-0,35 dengan sebagian area juga menyentuh range 0,35-0,4 meter. Perubahan tersebut menunjukkan adanya pengaruh dari penyempinan area Selat Madura serta perubahan kedalam terhadap amplitudo S2. Variasi nilai amplitudo S2 pada area penelitian memungkinkan untuk menghasilkan tipe pasang surut yang berbeda pada sepanjang area penelitian.



Gambar 4.8 Peta co-amplitudo S2

Peta co-range S2 memiliki nilai fase yang lebih panjang mulai dari 3,5 sampai 8 seperti pada Gambar 4.10. Perambatan gelombang pasang surut fase S2 terjadi mulai dari selat madura menuju ke arah Laut Jawa. Pola kontur lebih rapat pada area sempit Selat

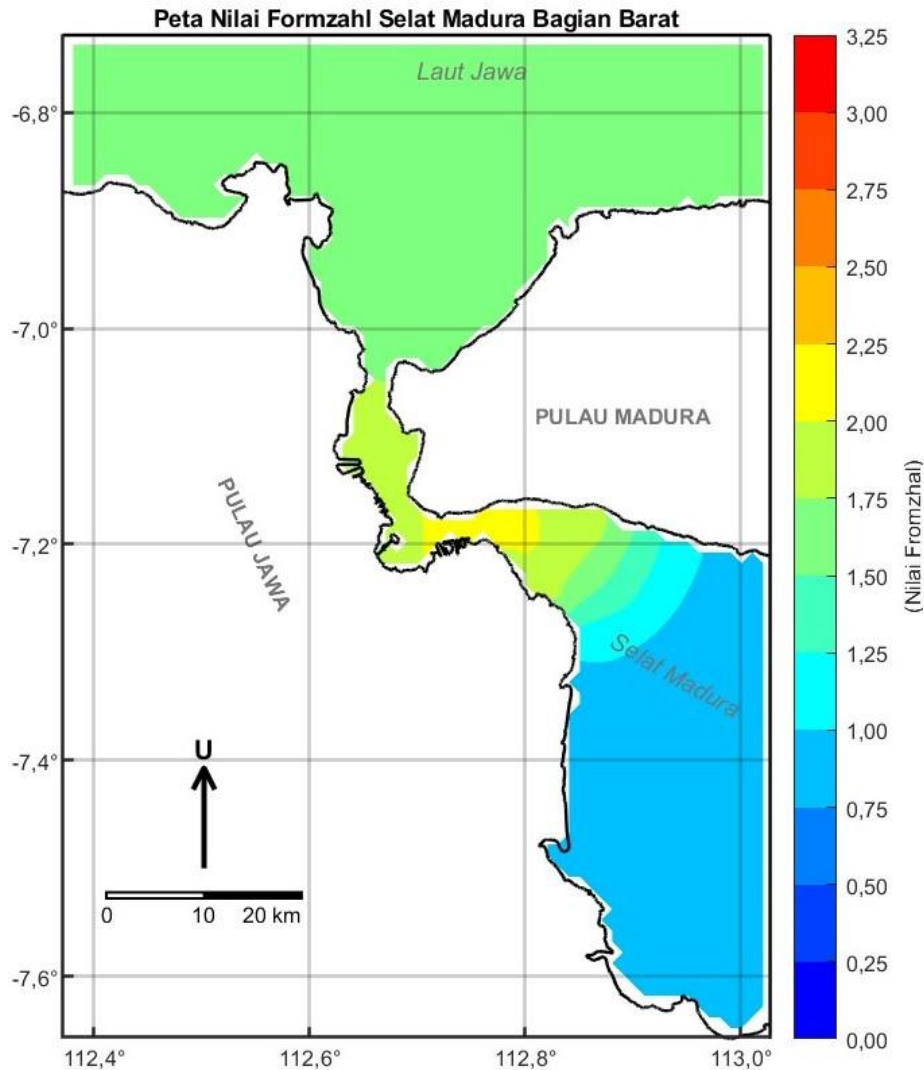
Madura dengan fase berkisar 4,75 - 7,25 pada area sempit selat madura menunjukkan bahwa perambatan gelombang pasang surut konstanta S2 lebih cepat pada area tersebut.

4.4 Peta Tipe Pasang Surut

Peta tipe pasang surut yang dihasilkan dalam penelitian di area Selat Madura bagian barat memiliki variasi jenis pasang surut secara spasial dari bagian laut luas Laut Jawa hingga ke area Selat Madura yang lebih sempit seperti pada Gambar 4.11. Pada bagian Laut Jawa mengarah kedalam selat, nilai fromzhal tinggi dengan kisaran nilai fromzhal 1,5 samapi 1,75 yang diklasifikasikan sebagai campuran dominan diurnal. Hal ini konsisten dengan peta *co-range* O1 dan K1 yang menunjukkan penguatan amplitudo diurnal serta garis *co-fase* yang lebih rapat dan melengkung indikasi pengaruh selat sempit dan dangkal. Dominasi diurnal tersebut membuat pembilang persamaan formzahl lebih besar daripada penyebut.

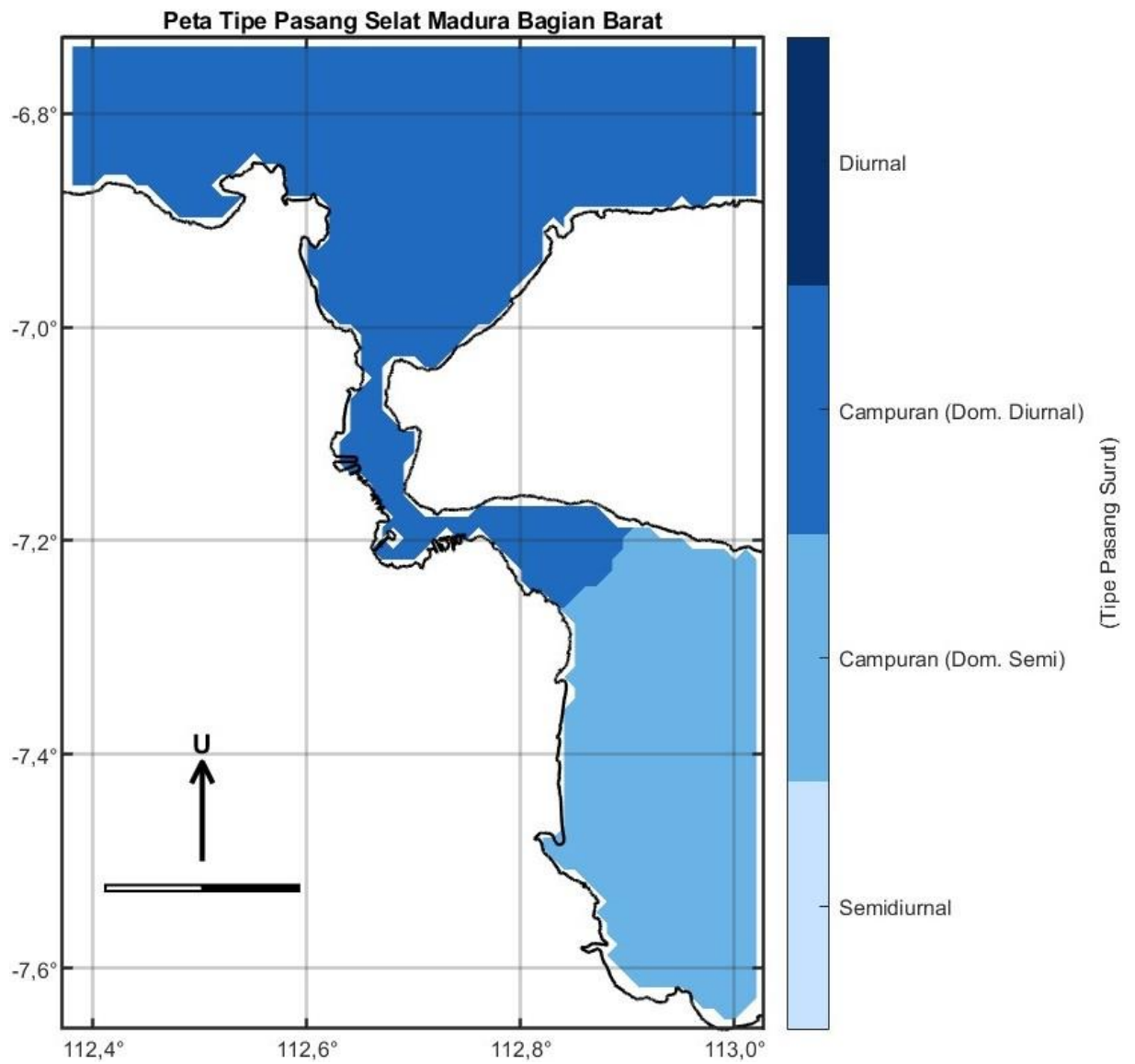
Pada area sempit Selat Madura nilai fromzhal meningkat menjadi rentan 1,75 - 2,0 yang meningkat lagi 2,0 – 2,25 yang selanjutnya sebelum keluar dari area sempit Selat Madura nilai fromzhal turun menjadi kisaran 1,75 - 2,0 sampai kisaran 1,5 – 1,75. Hal tersebut sangat dipengaruhi oleh amplitudo dari konstanta pasang surut semidiurnal S2 dan M2 yang memiliki nilai variasi amplitudo pada daerah tersebut. Namun pada area tersebut masih termasuk dalam area tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal.

Selanjutnya pada area yang lebih lebar Selat Madura terjadi penurunan nilai fromzhal dari rentan 1,25 – 1,5 sampai yang terendah 0,75 – 1,0. Perubahan nilai fromzhal tersebut oleh besarnya nilai amplitudo M2 serta variasi nilai amplitudo S2. Pada area tersebut tipe pasang surut sudah berubah ke arah tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal. Perbedaan variasi nilai fromzhal tersebut sangat dipengaruhi oleh pengaruh amplitudo yang dipengaruhi oleh keadaan kedalaman dan penyempitan selat.



Gambar 4.9 Peta Sebaran Nilai Fromzhal

Sehingga pada area penelitian kali ini didapatkan variabilitas tipe pasang surut secara spasial atas dua tipe pasang surut yaitu campuran dominan diurnal dan campuran dominan semidiurnal. Pada Gambar 4.12 yang lebih jelas bahwa area Laut Jawa menuju ke dalam Selat Madura tipe pasang surut yaitu tipe campuran dominan diurnal hal tersebut dipengaruhi oleh nilai amplitudo K_1 yang cukup besar pada area tersebut dimana nilainya 0,45-0,5 meter serta stabilitas nilai amplitudo O_1 dimana seperti yang diketahui K_1 merupakan konstanta harmonik diurnal yang pada persamaan fromzhal sebanding dengan nilai fromzhal (Poerbandono dan Djunarsjah, 2005). Untuk area selanjutnya yang berada di Selat Madura memiliki tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal dipengaruhi besar oleh nilai amplitudo M_2 dan S_2 yang merupakan konstanta semidiurnal. Variasi nilai amplitudo M_2 pada area campuran dominan semidiurnal berkisar antara 0,2 sampai 0,5 dan amplitudo S_2 berkisar pada 0,15 - 0,45 meter.



Gambar 4.10 Peta tipe pasang surut Selat Madura Bagian Barat

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan proses penelitian yang telah dilakukan dengan area penelitian Selat Madura bagian barat dengan menggunakan model hidrodinamika didapatkan kesimpulan bahwa, sebagai berikut.

1. Pada penelitian ini didapatkan model hidrodinamika pasang surut air laut dengan nilai RSME 0,18 meter, dengan perbedaan *tidal range* 0,4 meter, serta memiliki fase yang mendekati sama. Hal tersebut menandakan model memiliki keakuran yang baik dan dapat digunakan dalam pembangunan peta *co-range* dan tipe pasang surut.
2. Bahwa pada penelitian ini dengan empat komponen pasang surut K1, O1, M2, dan S2 didapatkan nilai amplitudo K1 pada area penelitian berkisar 0,4 – 0,5 meter, amplitudo O1 berkisar pada 0,2 – 0,3 meter, amplitudo M2 berkisar 0,25 – 0,50 meter, dan amplitudo S2 berkisar 0 – 0,40 meter. Nilai amplitudo komponen diurnal memiliki variasi yang lebih sedikit dengan variasi komponen semidiurnal dengan kisaran besar amplitudo komponen semidiurnal yang lebih besar. Sedangkan untuk pola perambatan gelombang pasang surut pada area penelitian berdasarkan peta yaitu untuk konstanta harmonik diurnal K1 dan O1 memiliki pola perambatan pasang surut dimulai dari dua sisi yaitu dari sisi Selat Madura bagian timur dan Laut Jawa yang bertemu pada area sempit Selat Madura. Pada sisi timur Selat Madura fase K1 merambat mulai dari waktu 12,25 sampai ke area sempit Selat Madura pada waktu 13,75 sedangkan untuk perambatan fase dari arah Laut Jawa merambat dari waktu 13 sampai ke area sempit Selat Madura pada waktu 13,75. Fase O1 merambat dari sisi Selat Madura bagian timur dengan waktu 11,75 yang bertemu pada fase waktu 12,25 sedangkan untuk arah dari Laut Jawa masuk ke area sempit memiliki fase waktu 10,75 hingga 12,25. Pola perambatan fase gelombang pasang surut komponen semidiurnal berbeda dimana perambatan gelombangnya satu arah yaitu dari arah timur menuju arah barat, dari Selat Madura keluar ke arah Laut Jawa dari timur ke barat. Untuk fase M2 merambat dari waktu 2,5 sampai 6,5 dari arah Selat Madura bagian timur dengan kontur yang rapat sampai ke arah Laut Jawa bagian barat. Fase S2 merambat dari waktu 4,75 sampai 7,25 dengan arah dari Selat Madura ke Laut Jawa.
3. Variabilitas tipe pasang surut pada area penelitian didapatkan dua tipe pasang surut yaitu tipe campuran dominan diurnal dan campuran dominan semidiurnal dengan nilai *fromzhal* berkisar dari nilai 0,75 sampai 2,25. Hal tersebut dipengaruhi besar oleh data amplitudo K1 untuk area campuran dominan diurnal dan amplitudo S2 dan M2 besar memengaruhi tipe pasang surut dominan semidiurnal pada area Selat Madura bagian barat tersebut.

5.2 Saran

Pada dasar penelitian ini masih banyak yang perlu ditambahkan dimana pada penelitian ini hanya menggunakan satu stasiun pasang surut untuk melakukan validasi model dengan luas sedemikian. Penggunaan lebih dari satu stasiun khususnya pada area ujung model dan tengah model sehingga model dapat tervalidasi pada beberapa area. Selanjutnya diharapkan dilakukan

pemodelan hidrodinamika dengan grid model yang lebih kecil serta dengan kepadatan data yang lebih rapat. Hal tersebut agar menghasilkan model yang lebih akurat sehingga hasil peta pasang surut lebih detail dan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alajuri, M. H. S., Kusuma, H. A., Bavitra, B., & Harahap, B. I. (2025). Development of an IoT-Based Tidal Gauge With Ultrasonic Sensors. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 7(2), 243-252.
- Anisa, N., Suhana, M. P., & Wirayuhanto, H. (2023). Pemodelan Hidrodinamika 2-Dimensi Arus Laut Permukaan Perairan Desa Berakit Kabupaten Bintan. *Rekayasa*, 16(2), 148–155. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.17227>
- Benharra, A., Raissouni, A., Belattmania, A., Aangri, A., Chtioui, T., Khali, L., Ed-daoudy, L., & El, A. (2025). *SoftwareX Tidenergy : A MATLAB-based tool for global tidal energy computation and visualization using the FES2014b tide model*. 30(January).
- Dumatubun, I. A. P. P., Pranowo, W. S., Sartimbul, A., Setiyadi, J., Sari, S. H. J., & Setyawan, F. O. (2024). Karakteristik Arus Permukaan Laut pada Selat Madura: Characteristics of Sea Surface Current in Madura Strait. *Jurnal Chart Datum*, 10(1), 1-10.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBT>2.0.CO;2)
- Froditus, N. O. E. (2018). Analisis Pola Sebaran Sedimen Terhadap Pendangkalan Dermaga Menggunakan Pemodelan Hidrodinamika 3 Dimensi (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember)
- Gebco, T., Seabed, N. F., Foundation, N., Seabed, T., Foundation, T. N., Commission, I. O., & Gebco, T. (2021). *The GEBCO _ 2021 Grid*. July.
- Hidayah, Z., & Wiyanto, D. B. (2021). Pemodelan Sistem Informasi Geografis untuk Pemetaan Kesesuaian Wilayah Perairan dan Pesisir Selat Madura. *Rekayasa*, 14(1), 17–25. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i1.9987>
- Huff, T. P., Feagin, R. A., & Figlus, J. (2022). Delft3D as a tool for living shoreline design selection by coastal managers. *Frontiers in Built Environment*, 8, 926662.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*
- Maya, E. B. S., Bisman, N. dan Jonson, L. G. (2019). *ANALISIS RETRACKING WAVEFORM DATA SATELIT ALTIMETER PADA DALAM DI LAUT HALMAHERA WAVEFORM RETRACKING ANALYSES OF ALTIMETRY SATELLITE DATA AROUND GULF , SMALL ISLANDS , AND DEEP WATERS IN HALMAHERA SEA Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan , FPIK-IPB , Bogor , 16680 ,*
- Khalid, M., Akram, R., & Muttaqin, K. (2022). Sistem Monitoring Pasang Surut Air Laut Berbasis Web Menggunakan Fuzzy Logic Pada Kuala Langsa. *Journal of Information and Technology*, 2(2), 65–69. <https://doi.org/10.32938/jitu.v2i2.3254>
- Lase, D. N., & Nadzir, Z. A. (2025). Evaluasi Komponen Harmonik Pasang Surut Dengan Data Altimetri Pesisir Dan Tide Gauge Di Pesisir Barat Daya Sumatera. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 18(3), 160-171.
- Lukman, A. A., Sugianto, D. N., Pranowo, W. S., & Wirasatriya, A. (2025). *Analisis Co Tidal Chart dan Perambatan Pasang Surut di Perairan Indonesia Bagian Barat*. 07(02), 157–171. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v7i2.26802>
- Munawar, M., Mulsandi, A., & Hidayat, A. M. (2020). Model Estimasi Data Intensitas Radiasi Matahari Untuk Wilayah Banten. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 21(2), 53–61. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v21i2.4171>
- Nusratina, R. H., Haryo, D., & Ismanto, A. (2023). *Studi Karakteristik Arus Laut di Selat Mansuar , Kabupaten Raja Ampat Berdasarkan Pemodelan Hidrodinamika 2D*. 05(02), 151–164.

- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Putra, A. Y. N., & Pratomo, D. G. (2017). Pengembangan Co-Tidal Charts Untuk Analisis Karakteristik Pasang Surut Perairan Laut Jawa. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), 1–4. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25241>
- Prajawati, P. (2021). STATUS KEBERLANJUTAN DAN STRATEGI PENGELOLAAN EKOWISATA KAWASAN MANGROVE BEBANGA KABUPATEN MAMUJU PROVINSI SULAWESI BARAT (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Su, M., & Wang, Z. (2013). *Further Research on the Tidal Wave System in the Southern Yellow Sea*. 1996.
- Poerbandono, & Djunarsjah, E. 2005. Survei Hidrografi. Bandung: Refika Aditama.
- Ritista P. Atmaja, R., M. Radjawane, I., & Tarya, A. (2019). Pola Arus Pasang Surut di Perairan Wakatobi. *Prosiding Seminakel, SE-Komisi B1*, 24–31. <https://prosidingseminakel.hangtuah.ac.id/index.php/jurnal/article/view/40>
- Sufyan, A., Risandi, J., & Akhwady, R. (2023). Observasi Pasang Surut dan Arus di Muara Porong untuk Mendukung Pengembangan Pulau Lusi: Observation of Tide and Current in Muara Porong to Support Lusi Island Development. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 200-206.
- Sugito, S., Muliadi, M., & Apriansyah, A. (2018). Distribusi Salinitas di Estuari Kapuas Kecil. *Prisma Fisika*, 6(2), 68. <https://doi.org/10.26418/pf.v6i2.24591>
- Sumarsono, S., Nurhadi, N., & Yuana, B. R. (2018). Studi Kecelakaan Kapal Pada Alur Pelayaran Barat Selat Madura, Tanjung Perak, Surabaya. *Info-Teknik*, 18(2), 215–234. <http://ppjp.unlam.ac.id/journal/index.php/infoteknik/article/view/4348/3858>
- Supriyadi, E., Siswanto, S., & Pranowo, W. S. (2019). Karakteristik Pasang Surut Di Perairan Pameungpeuk, Belitung, Dan Sarmi Berdasarkan Metode Admiralty. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 19(1), 29. <https://doi.org/10.31172/jmg.v19i1.518>
- Zahra, A. I. (2024). No Title. *Pemodelan Hidrodinamika 3 Dimensi Untuk Mengestimasi Laju Sedimen Di Teluk Lamong (Doctoral Dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember)*.
- Zhang, Q., Su, M., Yao, P., Chen, Y., & Stive, M. J. F. (2020). *Dynamics of a Tidal Current System in a Marginal Sea : A Case Study of the Yellow Sea , China*. 7(December), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.596388>

LAMPIRAN

1. Skrip Pengolahan Data Pasang Surut Menggunakan T-Tide

```
%% =====  
% T_TIDE LOOP ANALISIS HARMONIK PASUT (FINAL FIX)  
%  
% Input : Bahan_Loop_Koreksi.mat  
%         - A2 [Nst x 2] (Lon, Lat)  
%         - time_datetime_2024 [Nt x 1] (datetime, interval 1 jam)  
%         - ZWL_ts_2024 [Nt x Nst] (elevasi pasut)  
%  
% Output : Hasil_Loop_Koreksi_Fix.mat  
%          - Tabel M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Mf, Mm  
%  
% Kolom tabel:  
% Lon | Lat | Amplitude | Phase_deg | Phase_hour | Frequency  
% =====  
  
clear; clc;  
  
%% ===== 1. LOAD DATA =====  
load('Bahan_Loop_Koreksi.mat', ...  
     'A2', 'time_datetime_2024', 'ZWL_ts_2024');  
  
lon = A2(:,1);  
lat = A2(:,2);  
  
eta = ZWL_ts_2024; % [Nt x Nst]  
[Nt, Nst] = size(eta);  
  
fprintf('Jumlah stasiun : %d\n', Nst);  
fprintf('Jumlah timestep : %d\n\n', Nt);  
  
%% ===== 2. PARAMETER WAKTU =====  
dt_hours = hours(time_datetime_2024(2) - time_datetime_2024(1));  
start_time = datevec(time_datetime_2024(1));  
  
%% ===== 3. KONSTITUEN =====  
constList = {'M2', 'S2', 'N2', 'K2', 'K1', 'O1', 'P1', 'Mf', 'Mm'};  
nCons = numel(constList);  
  
Amp = NaN(Nst, nCons);  
Phase = NaN(Nst, nCons);  
Freq = NaN(Nst, nCons);  
  
%% ===== 4. LOOP T_TIDE =====  
fprintf('=== Mulai analisis t_tide ===\n');  
tic;  
  
for ist = 1:Nst  
    ts = eta(:, ist);  
  
    % Validasi data  
    if all(isnan(ts)) || std(ts, 'omitnan') < 1e-6  
        warning('Stasiun %d dilewati (data tidak valid)', ist);  
        continue;  
    end  
end
```

```

end

try
    tidestruc = t_tide(ts, ...
        'interval', dt_hours, ...
        'start_time', start_time, ...
        'latitude', lat(ist), ...
        'output', 'none');

    names = strtrim(cellstr(tidestruc.name));
    tidecon = tidestruc.tidecon;
    freq_tt = tidestruc.freq;

    for ic = 1:nCons
        idx = find(strcmpi(names, constList{ic}));
        if ~isempty(idx)
            Amp(ist, ic) = tidecon(idx,1);
            Phase(ist, ic) = tidecon(idx,3);
            Freq(ist, ic) = freq_tt(idx); % cph
        end
    end

catch ME
    warning('t_tide gagal di stasiun %d (%s)', ist, ME.message);
end

% Progress tiap 25 stasiun
if mod(ist,25)==0 || ist==Nst
    elapsed = toc;
    fprintf('Stasiun %d/%d | waktu: %.1f menit\n', ...
        ist, Nst, elapsed/60);
end

end

total_time = toc;
fprintf('\n=== ANALISIS SELESAI ===\n');
fprintf('Total waktu running : %.2f menit (%.2f jam)\n\n', ...
    total_time/60, total_time/3600);

%% ===== 5. PHASE DALAM JAM =====
Phase_hour = Phase ./ 360 ./ Freq; % jam

%% ===== 6. BENTUK TABEL =====
M2 = table(lon, lat, Amp(:,1), Phase(:,1), Phase_hour(:,1), Freq(:,1), ...
    'VariableNames',
    {'Lon', 'Lat', 'Amp_M2', 'Phase_deg_M2', 'Phase_hour_M2', 'Freq_M2'});

S2 = table(lon, lat, Amp(:,2), Phase(:,2), Phase_hour(:,2), Freq(:,2), ...
    'VariableNames',
    {'Lon', 'Lat', 'Amp_S2', 'Phase_deg_S2', 'Phase_hour_S2', 'Freq_S2'});

N2 = table(lon, lat, Amp(:,3), Phase(:,3), Phase_hour(:,3), Freq(:,3), ...
    'VariableNames',
    {'Lon', 'Lat', 'Amp_N2', 'Phase_deg_N2', 'Phase_hour_N2', 'Freq_N2'});

K2 = table(lon, lat, Amp(:,4), Phase(:,4), Phase_hour(:,4), Freq(:,4), ...
    'VariableNames',
    {'Lon', 'Lat', 'Amp_K2', 'Phase_deg_K2', 'Phase_hour_K2', 'Freq_K2'});

```

```

K1 = table(lon, lat, Amp(:,5), Phase(:,5), Phase_hour(:,5), Freq(:,5), ...
    'VariableNames',
    {'Lon','Lat','Amp_K1','Phase_deg_K1','Phase_hour_K1','Freq_K1'});

O1 = table(lon, lat, Amp(:,6), Phase(:,6), Phase_hour(:,6), Freq(:,6), ...
    'VariableNames',
    {'Lon','Lat','Amp_O1','Phase_deg_O1','Phase_hour_O1','Freq_O1'});

P1 = table(lon, lat, Amp(:,7), Phase(:,7), Phase_hour(:,7), Freq(:,7), ...
    'VariableNames',
    {'Lon','Lat','Amp_P1','Phase_deg_P1','Phase_hour_P1','Freq_P1'});

Mf = table(lon, lat, Amp(:,8), Phase(:,8), Phase_hour(:,8), Freq(:,8), ...
    'VariableNames',
    {'Lon','Lat','Amp_Mf','Phase_deg_Mf','Phase_hour_Mf','Freq_Mf'});

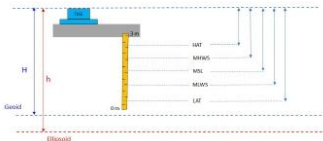
Mm = table(lon, lat, Amp(:,9), Phase(:,9), Phase_hour(:,9), Freq(:,9), ...
    'VariableNames',
    {'Lon','Lat','Amp_Mm','Phase_deg_Mm','Phase_hour_Mm','Freq_Mm'});

%% ===== 7. SIMPAN HASIL =====
save('Hasil_Loop_Koreksi_Fix.mat', ...
    'M2','S2','N2','K2','K1','O1','P1','Mf','Mm');

disp('✓ Semua hasil berhasil disimpan ke Hasil_Loop_Koreksi_Fix.mat');

```

2. Deskripsi Stasiun Pasang Surut Tanjung Perak

 BADAN INFORMASI GEOSPASIAL (BIG) Jl. Jakarta – Bogor Km. 46 Cibinong 16911 Telepon (021) 8758061, PO. BOX 46 CBI Cibinong Bogor Web https://srgi.big.go.id email: srgi@big.go.id		 Surabaya	
DESKRIPSI STASIUN PASANG SURUT			
Kode Stasiun	SRBY	Nama Stasiun	Surabaya
Desa/Kelurahan	Ujung	Kabupaten/Kota	Surabaya
Kecamatan	Semampir	Provinsi	Jawa Timur
Lintang	7° 12' 0.216" LS	Bujur	112° 44' 26.160" BT
Uraian lokasi	Terletak di PT PAL Indonesia Surabaya		
TITIK KONTROL GEODESI (TKG) STASIUN PASANG SURUT			
Koordinat Kartesian (SRGI 2013 Epoch 2012.0)		Koordinat Geodetik (WGS84)	
Kode TKG	OSBY	Lintang	7° 11' 59.964" LS
X	-2446233.0920 meter	Bujur	112° 44' 26.264" BT
Y	5836280.323 meter	Tinggi Ellipsoid (h)	32.51 meter
Z	-794085.783 meter	Tinggi Orthometrik (H)	2.297322998 meter
Kecepatan Pergeseran Kartesian		Nilai Gayabarat	
Vx	-0.024 meter / tahun	-	
Vy	-0.014 meter / tahun	-	
Vz	-0.010 meter / tahun	-	
Tinggi TKG terhadap Datum Pasang Surut		Sketsa Hubungan Tinggi	
HAT (m)	0.913		
MHWS (m)	1.595		
MSL (m)	2.313		
MLWS (m)	2.936		
LAT (m)	3.756		
Beda Tinggi TKG terhadap Acuan Top Palem ?h Top Palem-TKG (m) *Panjang Palem 3 meter			
0.4451			
FOTO DAN SKETSA			
Foto Bangunan dan TKG		Sketsa Lokasi	
 			

 BADAN INFORMASI GEOSPASIAL	BADAN INFORMASI GEOSPASIAL (BIG) Jl. Jakarta – Bogor Km. 46 Cibinong 16911 Telepon (021) 8758061, P.O. BOX 46 CBI Cibinong Bogor Web https://srgi.big.go.id email: srgi@big.go.id	 Surabaya
Keterangan : • Periode Hasil Pengolahan Data Pasang Surut 1 Tahun (2024) • Interval Pengolahan Data Pasang Surut 1 Jam • Nilai Konstanta Harmonik merupakan layanan PNBP di BIG (PP 49 tahun 2019), silahkan menghubungi pelayanan terpadu informasi geospasial 021-8753155 atau email info@big.go.id.	HAT : Highest Astronomical Tide MHWS : Mean Higher Water Spring MSL : Sea Level atau muka laut rata-rata MLWS : Mean Lowest Water Spring LAT : Lowest Astronomical Tide	
Tanggal Pembaharuan : 06 March 2025	Kontrol Kualitas oleh Direktorat Sistem Referensi Geospasial	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Praya, 04 April 2003, merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Lahir dari orang tua sebagai guru dan petani. Penulis tumbuh besar di Pulau Lombok khusus Desa Lajut, Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Negeri 1 Lajut, SMP Negeri 1 Praya dan SMA Negeri 1 Praya. Setelah lulus dari SMA tahun 2021, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Geomatika FTSPK - ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5016211060. Penulis datang pertama kali ke kampus ITS Surabaya pada Februari 2022 yang merupakan pengalaman pertama ke luar kota. Selama berkuliah Departemen Teknik Geomatika Penulis tidak banyak kegiatan internal maupun eksternal. Namun selama kuliah pernah melakukan magang pada proyek bendungan meninting, Nusa Tenggara Barat oleh PT. Utama Karya dan Kerja Praktek pada PT. UTSG.