

**Article Info:**

Received 10 June 2022

Revised 17 June 2024

Accepted 20 March 2025

Corresponding Author:

Teguh Nugraha

Study Program of Marine Science,

Graduate School,

IPB University

E-mail:

Teguh_c551180071@apps.ipb.ac.id

© 2025 Author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license, allowing unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided proper credit is given to the original authors.



Characteristics of Current Pattern in Jakarta Bay in The West and East Monsoons

Teguh Nugraha^a, I Wayan Nurjaya^b, Rastina^b, Santi Susanti^b^a Study Program of Marine Science, Graduate School, IPB University, Darmaga Campus, Bogor 16680, Indonesia^b Department of Marine Science and Technology, Faculty of Fishery and Marine Science, IPB University, Darmaga Campus, Bogor 16680, Indonesia

Abstract

Jakarta Bay is a coastal area influenced by both natural factors (wind, currents, waves) and human activities (residential areas, coastal development, industry, and resource exploitation). The monsoon phenomenon in the Java Sea affects hydrodynamic patterns, especially current dynamics in Jakarta Bay. This study analyzes changes in current patterns during two distinct monsoon seasons (west and east) in 2021 using a hydrodynamic modeling approach. The model was developed using OpenFlows software with input data including bathymetry, tidal, wind, and wave conditions. Model validation was conducted using tidal and current measurements from field observations in March and August 2021. The results show seasonal variations in current direction and velocity, both in tidal phases and non-tidal (residual) currents. The current patterns aligned with seasonal wind directions, indicating a strong monsoonal influence. Model validation using Root Mean Square Error (RMSE) and Taylor diagram analysis demonstrated good agreement between modeled and observed data, confirming the model's reliability. These hydrodynamic modeling results can serve as a foundation for further studies, such as simulations of pollutant, sediment, and debris dispersion in Jakarta Bay.

Keywords: Current pattern, hydrodynamic, Jakarta Bay, monsoon, OpenFlows

Karakteristik Pola Arus di Perairan Teluk Jakarta Pada Musim Barat dan Timur

Abstrak

Teluk Jakarta merupakan contoh wilayah pesisir yang berpotensi terus mengalami perubahan, baik dipengaruhi oleh faktor alami seperti angin, arus, dan gelombang, serta aktivitas manusia seperti pemukiman, pembangunan pesisir, industri, serta eksplorasi sumber daya perairan dan pesisir. Adanya fenomena monsun di Laut Jawa berpengaruh terhadap perubahan pola hidrodinamika perairan Teluk Jakarta, terutama perubahan pola arus. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan pola arus perairan Teluk Jakarta tahun 2021 pada dua musim yang berbeda (musim barat dan musim timur) melalui pendekatan model hidrodinamika. Penyelesaian solusi hidrodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenFlows dengan data masukan berupa batimetri, pasang surut, angin, dan gelombang, serta validasi hasil model menggunakan data pasang surut dan arus hasil pengukuran di lapangan pada bulan Maret dan Agustus tahun 2021. Hasil pemodelan hidrodinamika menunjukkan adanya perubahan arah dan kecepatan arus pada dua musim yang berbeda, baik berdasarkan fase pasang surut yang berbeda maupun pada arus non-pasut (residu). Pola arus pada kedua kondisi sejalan dengan pola perubahan angin pada kedua musim, mengindikasikan kuatnya pengaruh rezim monsun di perairan Teluk Jakarta. Hasil validasi model hidrodinamika menggunakan arus dan pasang surut berdasarkan nilai Root Mean Square Error (RMSE) yang ditampilkan pada diagram Taylor menunjukkan nilai yang baik, mengindikasikan bahwa hasil model dapat merepresentasikan kondisi arus sebenarnya di lapangan. Hasil model hidrodinamika yang baik ini bermanfaat untuk menjadi dasar membuat model lanjutan seperti model sebaran polutan, sedimen, sampah dan lain-lain.

Kata kunci: Hidrodinamika, muson, OpenFlows, pola arus, Teluk Jakarta

1. Pendahuluan

Zona pesisir merupakan wilayah yang dinamis karena berpotensi mengalami perubahan secara terus menerus. Beberapa faktor yang berperan dalam perubahan tersebut seperti angin, arus, gelombang, intrusi sungai, serta aktivitas pembangunan pada wilayah pesisir tersebut (Seiler, 2015; Hermansyah et al., 2018; Sobrinho et al., 2021a; Rahdarian dan Winter, 2025), seperti wilayah pesisir Teluk Jakarta. Proses hidrodinamika di perairan Teluk Jakarta dipengaruhi oleh rezim musim Laut Jawa, yaitu musim barat dan musim timur (Rahmawitri et al., 2017), yang mana perubahan musim ini sangat berpengaruh terhadap perubahan pola arus (Setiyadi et al. 2023). Perubahan musim juga berpengaruh terhadap curah hujan atau debit sungai yang masuk ke perairan lain, yang mana Teluk Jakarta sendiri memiliki banyak muara sungai seperti Cisadane, Citarum, Ciliwung, Angke, Cakung, dll (Hermansyah et al., 2018; Surya et al., 2019; Ramadhan et al., 2021), yang berpotensi besar membawa material atau polutan, baik fisik maupun kimiawi. Selanjutnya adanya penambahan pulau buatan pada wilayah perairan Teluk Jakarta, seperti di wilayah pantai Muara Kamal dan Cengkareng Drain, dapat memengaruhi pola arus laut (van der Wulp, 2016). Karakteristik tersebut yang menyebabkan menariknya kajian simulasi perubahan pola arus di perairan Teluk Jakarta, serta karakteristik parameter oseanografi lainnya seperti pasang surut, angin, dan gelombang, berdasarkan perbedaan musim barat dan musim timur.

Perubahan pola arus yang dipengaruhi oleh perubahan musim dapat diperlihatkan melalui pemodelan hidrodinamika (Arifin et al., 2015; Atmadipoera et al., 2015; van der Wulp, 2016; Setyawan & Pamungkas, 2017), yaitu proses simulasi numerik suatu aliran berdasarkan formulasi persamaan matematika yang menggambarkan prinsip hidrolika (Rahdarian dan Winter, 2025). Pada penelitian ini, pemodelan hidrodinamika diselesaikan menggunakan perangkat lunak OpenFlows dengan solusi volume hingga (finite volume) yang menghasilkan data arus secara time series dan spasial (Arifin et al., 2015; Hermansyah et al., 2018; Sabhan et al., 2019; de Pablo et al., 2019). Parameter yang terlibat antara lain pasang surut, batimetri, angin, dan gelombang. Pola arus hasil model divalidasi menggunakan data arus dan pasang surut hasil observasi lapang untuk menunjukkan tingkat kemiripan hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya di lapangan (Garbossa et al., 2021; Sotillo et al., 2021; Tereza et al., 2021; Jackson et al., 2022). Pola sebaran arus ini dapat diasosiasikan dengan sebaran senyawa polutan, material sedimen, hingga aspek perubahan garis pantai akibat pergerakan arus dan gelombang (Sabhan et al., 2019). Oleh karena itu, informasi proses hidrodinamika sangat penting sebagai langkah awal prakiraan dampak yang ditimbulkan dari suatu kegiatan perubahan (penambahan atau pengurangan) kondisi lingkungan alami perairan.

Selama ini, penelitian perubahan pola arus di Teluk Jakarta dilakukan dengan validasi hasil menggunakan data reanalisis (Ramadhan et al., 2021), data hasil observasi pada salah satu parameter utama hidrodinamika seperti hanya pasang surut (van der Wulp et al., 2016; Diastomo et al., 2021), hanya data arus (Surya et al., 2019), atau hanya pada salah satu musim tertentu (Surya et al., 2019; Jasmin et al., 2020). Pada penelitian ini, validasi hasil dilakukan menggunakan data observasi arus dan pasang surut yang dilakukan pada dua musim, yaitu bulan Maret mewakili musim barat dan bulan Agustus mewakili musim timur. Oleh sebab itu, hasil model yang diperoleh diharapkan akan sangat merepresentasikan kondisi sebenarnya di Teluk Jakarta. Model hidrodinamika berakurasi tinggi yang diperoleh dapat digunakan untuk pemodelan lebih lanjut seperti pemodelan sebaran sedimen, sebaran polutan, dan juga perubahan garis pantai. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pola sirkulasi arus di Teluk Jakarta pada musim barat (Maret) dan musim timur (Agustus) menggunakan pendekatan pemodelan hidrodinamika berbasis OpenFlows.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian pemodelan pola arus di perairan Teluk Jakarta dilakukan pada koordinat 106,66 – 107,06 BT dan 5,83 – 6,13 LS (**Gambar 1**). Pengukuran lapang parameter kecepatan dan arah arus, serta pasang surut dilakukan selama 3 hari 3 malam pada posisi koordinat

6,03089 LS dan 106.72027 BT di kedalaman 5 m, pada bulan Maret dan Agustus untuk mewakili kondisi musim barat dan musim timur.

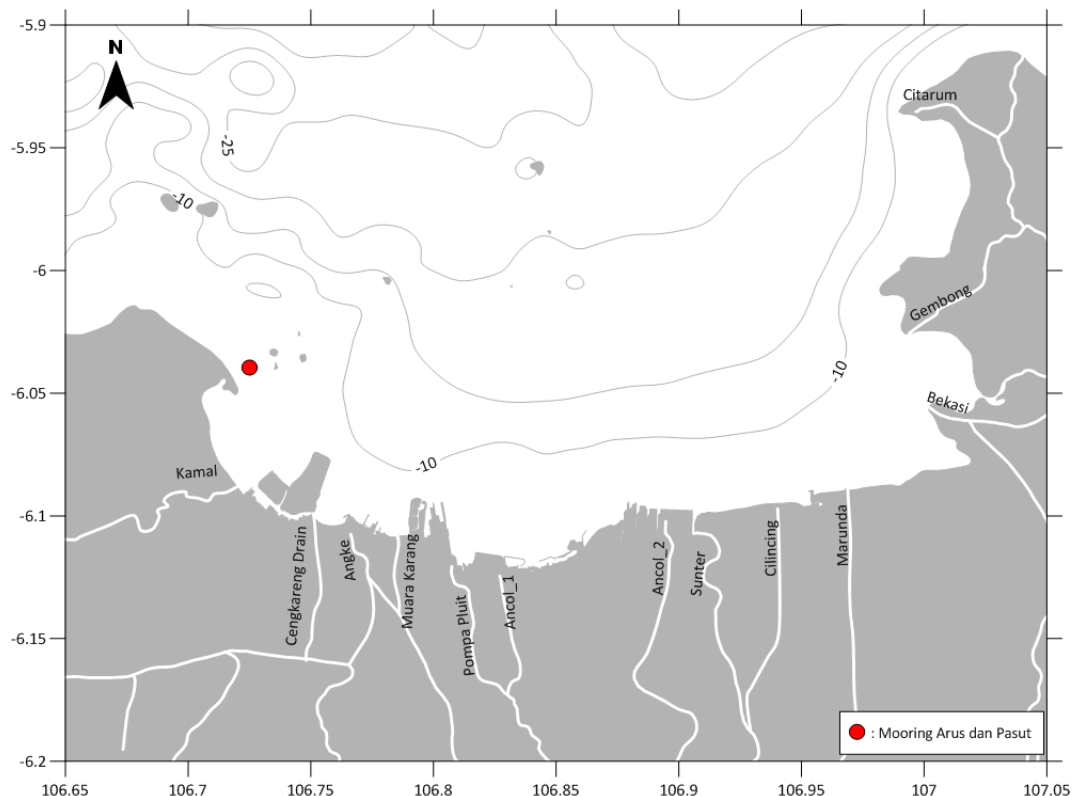


Figure 1. Study area and measurement points of current and tide in the Jakarta Bay waters

Gambar 1. Wilayah kajian dan titik pengukuran arus dan pasang surut di perairan Teluk Jakarta.

2.2. Persamaan Model Hidrodinamika

Model OpenFlows mengasumsikan keseimbangan hidrostatik dan pendekatan Boussinesq untuk mendiskritkan persamaan momentum (Persamaan 1), dan model ini menggunakan pendekatan volume hingga (finite volume). Kelebihan dari finite volume dibandingkan metode lain yaitu pendekatan beda hingga (finite-difference) dan pendekatan element hingga (finite-element), adalah dapat mengontrol aliran pada setiap volume (cell) sehingga dapat berjalan secara makroskopik, dan memungkinkan untuk menyelesaikan solusi pada setiap geometri jika menggunakan koordinat secara vertikal. Selain itu, finite volume sangat fleksibel sehingga dapat diimplementasikan ke dalam grid terstruktur maupun tidak (de Pablo et al., 2019; Lyras KG dan Lee, 2022). Persamaan keseimbangan untuk kecepatan horizontal dalam bentuk diferensial dan koordinat kartesian digambarkan pada Persamaan 2 dan 3, dengan asumsi tekanan hidrostatik vertikal merubah persamaan momentum menjadi persamaan tekanan. Kecepatan arus dihitung menggunakan persamaan kontinuitas (Persamaan 4). Nilai u , v , w adalah komponen kecepatan vektor, sedangkan x , y , dan z adalah arah vektor. Selanjutnya f adalah parameter koriolis, v_H dan v_v adalah turbulen viskositas horizontal dan vertikal. Tekanan dinotasikan sebagai p , g adalah percepatan gravitasi, dan ρ adalah masa jenis air (de Pablo et al., 2019).

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \quad (4)$$

2.3. Sumber Data

Data yang digunakan terdiri atas data pengukuran lapang (observasi) yaitu arus dan pasang surut yang digunakan untuk validasi model, serta data reanalisis (pasut, batimetri, angin, dan gelombang) yang digunakan sebagai masukan konfigurasi model (**Tabel 1**). Pengukuran pasang surut dan arus dilakukan dengan metode Euler (penambatan/mooring) dengan interval pengukuran 1 menit, selama 3 hari 3 malam seperti yang dilakukan oleh Kurniawan et al., (2022). Data observasi tersebut selanjutnya digunakan untuk validasi model hidrodinamika. Data batimetri diperoleh dari DISHIDROS TNI-AL seperti yang dilakukan oleh Rahma et al. (2022) dan dari ETOPO dengan resolusi 15 detik (30 m). Data angin dan gelombang bersumber dari Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) dengan interval waktu pengukuran 6 jam, seperti Wiyadi et al. (2022). Data gelombang yang digunakan adalah data tahun 2020 – 2021, berupa tinggi gelombang signifikan dan periodenya, yang merupakan hasil analisis gelombang global Meteo-France dengan resolusi 1/12 derajat dan durasi 3 jam. Data pasang surut juga diperoleh dari PUSHIDROSAL tahun 2016, yang digunakan sebagai salah satu masukan konfigurasi model.

Tabel 1. Sumber dan resolusi data yang digunakan dalam penelitian.

Table 1. Sources and resolutions of data used in the study.

Data	Data Acquisition		Resolutions	Sources
	Observation	Reanalysis		
Current Direction and Velocity	✓		Mooring data in 3 days and 3 night, interval 1 minute (03-29-2021 until 04-01-2021) and (08-24-2021 until 08-27-2021)	Observation Current meter JFE Infinity EM
Tide Elevation (Validation)	✓		Mooring data over 3 day, interval 1 minute	Observation Tide Logger JFE Compact TD
Tide Prediction (input model)		✓	resolution 1 hour	PUSHIDROSAL (www.pushidrosal.id)
Bathymetry		✓	resolution grid 15 second	DISHIDROS TNI-AL dan ETOPO1 data sources NOAA (www.ngdc.noaa.gov/)
Wind Direction and speed		✓	grid resolution 0,15 degree, interval 6 hour	Copernicus Marine Service (https://marine.copernicus.eu/)

<i>Data</i>	<i>Data Acquisition</i>		<i>Resolutions</i>	<i>Sources</i>
	<i>Observation</i>	<i>Reanalysis</i>		
<i>Wave Direction and speed</i>		<i>✓</i>	<i>grid resolution 0,083 degree, interval 6 hour</i>	<i>Copernicus Marine Service (https://marine.copernicus.eu/)</i>

2.4. Analisis Parameter Oseanografi

Data pasang surut PUSHIDROSAL tahun 2016 diprediksi menggunakan program Admiralty seperti yang dilakukan oleh Ahmad et al. (2017) dan Supriyono et al. (2020), sehingga diperoleh pola pasang surut musim barat dan musim timur tahun 2021. Selain gambaran fluktuasi, pasang surut juga diperoleh konstanta harmonik pasut yang selanjutnya digunakan untuk menentukan tipe pasang surut di lokasi kajian. Secara kuantitatif, tipe pasut di perairan Teluk Jakarta juga ditentukan dengan menghitung perbandingan (nisbah) antara amplitudo unsur-unsur pasut tunggal utama ($K1 + O1$) dengan amplitudo unsur-unsur pasut ganda utama ($M2 + S2$) atau dikenal sebagai bilangan Formzahl (Amalina et al., 2019). Pengolahan data angin dilakukan menggunakan perangkat lunak WRPLOT VIEW sehingga diperoleh diagram mawar angin dan dapat ditentukan dominasi arah dan kelas kecepatan angin (Lusiana & Wardoyo, 2017; Siahaan et al., 2021; de Pablo et al., 2022), dan arah angin dibagi menjadi delapan dengan nilai persen tenang. Pengolahan data gelombang juga menggunakan perangkat lunak WRPLOT VIEW sehingga diperoleh diagram mawar gelombang (wave rose) yang dapat digunakan untuk menentukan dominasi arah dan kecepatan gelombang, serta grafik distribusi frekuensi untuk menentukan dominasi tinggi gelombang (Pratiwi, 2020).

Informasi data gelombang didapatkan dari hasil data analisis gelombang global Meteo-France dengan resolusi 1/12 derajat dengan durasi 3 jam. Sistem gelombang Meteo-France didasarkan pada metode model MFWAM (Météo-France WAVE Model) yang merupakan model gelombang generasi ketiga yang menggunakan asimilasi altimetri. Model ini menggunakan dasar perairan Etopo dengan grid 2 menit sehingga menghasilkan data tinggi gelombang signifikan, periode gelombang dan arah gelombang. Data gelombang yang digunakan adalah data gelombang satu tahun terakhir (2020-2021) yang digambarkan tinggi gelombang signifikan dan periode gelombangnya. Selain itu, dilakukan pengkelasan terhadap arah dan tinggi gelombang pada 8 arah mata angin yang berbeda. Semua parameter gelombang merupakan gelombang signifikan yang kemudian dikategorikan kategorinya berdasarkan Pusat Meteorologi Maritim - BMKG. Nilai tinggi gelombang 0,1 m – 0,5 m dikategorikan gelombang tenang, 0,5 m – 1,25 m dikategorikan gelombang rendah, 1,25 m – 2,50 m dikategorikan gelombang sedang, 2,50 m hingga 4,0 m dikategorikan gelombang tinggi, 4,0 m – 6,0 m dikategorikan gelombang sangat tinggi, 6,0 - 9,0 m dikategorikan gelombang ekstrim dan lebih dari 9,0 m dikategorikan gelombang sangat ekstrim (BMKG, 2022).

2.5. Pemodelan Hidrodinamika (Pola Arus)

Pemodelan hidrodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenFlows, dengan pendekatan volume hingga (finite volume) (Marrone et al., 2016, de Pablo et al. 2022) dan strategi flux-driven untuk memfasilitasi beberapa proses secara bersamaan dan diprogram dalam bahasa ANSI FORTRAN 95. Model dibuat dalam satu grid besar dengan ukuran 748 x 480 sel, dengan lebar setiap sel adalah 50 m. Batasan model dibagi menjadi dua bagian yaitu batas terbuka dan batas tertutup. Batas tertutup merupakan garis pantai sepanjang wilayah kajian, sedangkan batas terbuka merupakan bagian perairan terbuka yang berhadapan langsung dengan Laut Jawa. Batas terbuka diberi gaya pembangkit berupa pasang surut yang menjalar di sepanjang batas, serta gaya gesek angin yang tersebar di seluruh permukaan perairan (Huguët et al., 2020). Data kedalaman perairan dibagi menjadi 3 kedalaman menggunakan metode sigma (de Pablo et al., 2019; Franz et al., 2021; Sobrinho et al., 2021b). Konfigurasi model hidrodinamika yang digunakan secara spesifik ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Konfigurasi model hidrodinamika yang digunakan.

Table 2. Configuration of the hydrodynamic model.

Parameter		Value	Unit	Notes
Cell numbers X (I) grid 1		748	cell	
Cell numbers Y (J) grid 1		480	cell	
Grid size 1		50 x 50	m	
Number of time step		30	second	
Time step interval		20160	second	
Tide		1/8	degree	Fes 2014
Geometry		3	layers	Sigma
Bathymetry			m	Etopo 15 second
Warming up		1	day	
Atmosphere	Precipitation	Change by time	mm	Copernicus
	Air temperature		°C	Marine Service
	Solar radiation		W/m2	
	Cloud cover		%	
	Humidity		[0-1]	
	Wind		m/s	
Boundaries	Open boundaries			Tide and wind
	Closed boundaries			Coastline of Jakarta Bay and islands around

2.6. Validasi Hasil Model

Validasi dilakukan untuk mengukur tingkat keerratan secara kuantitatif antara hasil simulasi model dengan kondisi sebenarnya yang ditunjukkan oleh data observasi. Data observasi untuk validasi model berupa data pasang surut dan arus yang diukur pada dua periode yaitu musim barat dan musim timur. Validasi digambarkan menggunakan diagram Taylor yang menunjukkan nilai Root Mean Square Error (RMSE), standar deviasi, dan korelasi (Choubin et al., 2018; Sotillo et al., 2021). Masing-masing nilai tersebut secara matematik ditunjukkan oleh persamaan 5. Pada persamaan 5, y adalah data observasi, y' adalah data model, dan n adalah jumlah data. Hasil validasi yang mendekati nilai 0 untuk RMSE menunjukan nilai yang baik.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^i (y - y')^2}.$$

(5)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pasang Surut

Pasang surut adalah proses naik turunnya paras atau elevasi muka laut (sea level) secara berkala yang ditimbulkan oleh adanya gaya tarik dari benda-benda angkasa, terutama matahari dan bulan terhadap massa air laut di bumi. Gaya tarik gravitasi tersebut menarik air laut ke arah bulan dan matahari sehingga menghasilkan dua tonjolan (bulge) pasang surut gravitasional di laut (Hasriyanti, 2015). Selain untuk keperluan teknis perencanaan bangunan pantai dan navigasi, pasang surut juga merupakan salah satu parameter penting dalam kajian dampak lingkungan akibat suatu kegiatan di perairan pesisir. Jika karakteristik arus perairan sangat dipengaruhi oleh pasang surut, maka akan lebih mudah memprediksi pergerakan material yang masuk ke perairan karena memiliki periode pasut yang tetap dan lebih panjang.

Konstanta harmonik pasut yang diperoleh dari hasil prediksi data PUSHIDROSAL menunjukkan bahwa tipe pasang surut di Teluk Jakarta adalah tunggal (diurnal), total amplitude pasang surut tunggal (K1, O1 dan P1) memiliki persentase yang cukup dominan

yaitu 77,54%, sedangkan pada pasang surut ganda (M2, S2, N2 dan K2) memiliki persentase yang kecil sebesar 19,00%, dan sisanya adalah pasang surut perairan dangkal (M4 dan MS4) 3,46% (**Tabel 3**). Hasil perhitungan bilangan Formzahl juga menunjukkan bahwa tipe pasut lokasi studi termasuk dalam kategori tunggal (diurnal) dengan nilai bilangan Formzahl 4,22. Tipe pasut ini merupakan tipe pasut yang dalam satu hari terjadi satu kali air pasang dan satu kali air surut. Tipe pasut dan fluktuasi muka air laut pada musim barat dan musim timur di Teluk Jakarta dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **3**. Kenaikan dan penurunan muka air terjadi satu kali dalam satu hari (diurnal) dan tipe ini tidak mengalami perubahan baik pada saat musim barat maupun musim timur.

Hasil perhitungan dari nilai konstanta pada **Tabel 4** menunjukkan elevasi muka air laut tunggang pasut untuk referensi muka air terendah (LAT) lebih besar dibandingkan referensi muka air rata-rata (MSL) baik pada kondisi pasang perbani (neap tide) maupun pasang purnama (spring tide). Waktu pengukuran periode pertama (bulan Maret-April 2021) dan periode kedua (bulan Agustus) merupakan kondisi pasut perbani (neap tide) yaitu fase pasang surut sedang dalam kondisi yang rendah. Pasang-surut purnama ini terjadi dua kali setiap bulan, yakni pada saat bulan baru dan bulan purnama (full moon). Sedangkan pasang-surut perbani (neap tides) terjadi ketika bumi, bulan dan matahari membentuk sudut tegak lurus, yakni saat bulan membentuk sudut 90° dengan bumi (Kurdi et al., 2019). Nilai tunggang pasut atau jarak antara pasang tertinggi dan surut terendah berdasarkan keseluruhan komponen adalah 1,26 m.

Tabel 3. Konstanta harmonik pasang surut Teluk Jakarta hasil prediksi data PUSHIDROSAL tahun 2016.

Table 3. Tidal harmonic constants of Jakarta Bay based on PUSHIDROSAL 2016 data prediction.

Constants	S0	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4
A (m)	0.6	0.05	0.04	0.01	0.01	0.27	0.13	0.09	0.01	0.01
g (°)	-	310.1	256	136	256	115	106	115	55.4	129.7

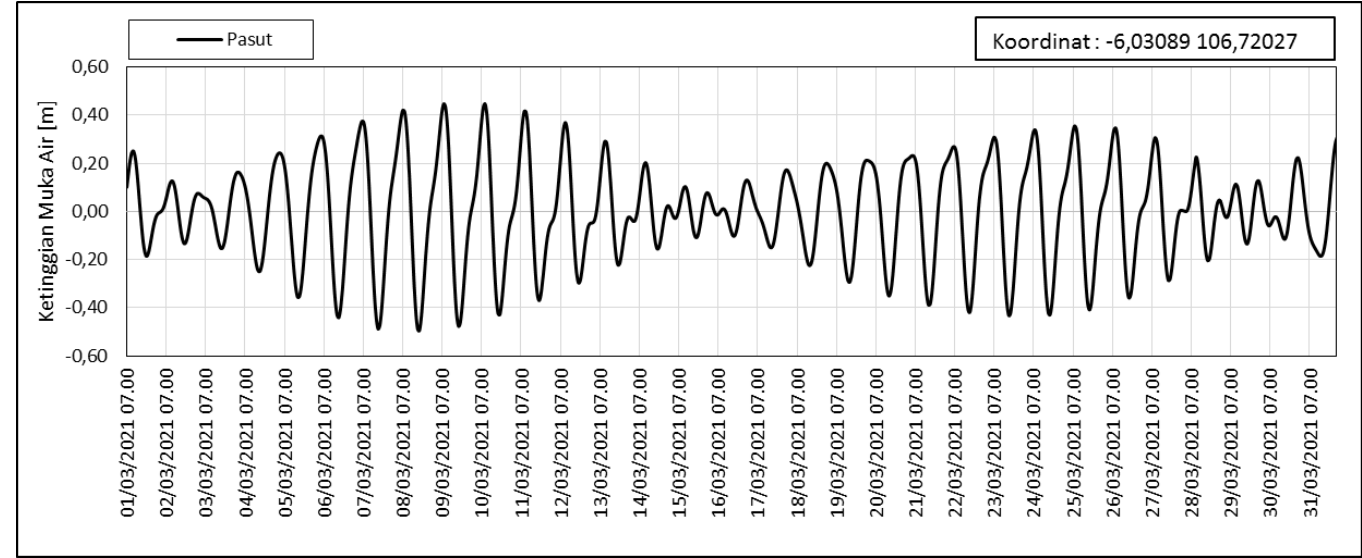


Figure 2. Tide graph of predicted results using tidal constants of 1-31 March 2021 (west season).

Gambar 2. Grafik pasut hasil prediksi dengan menggunakan konstanta pasut periode 1-31 Maret 2021 (musim barat).

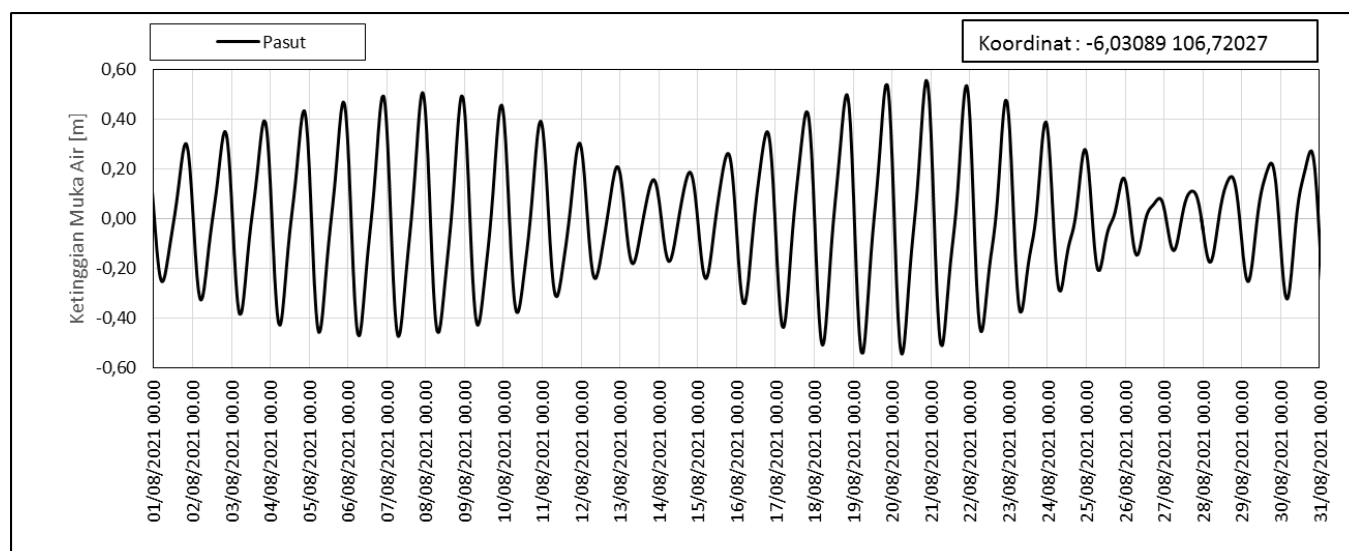


Figure 3 Tide graph of predicted results using tidal constants of 1-31 August 2021 (east season).

Gambar 3. Grafik pasut hasil prediksi dengan menggunakan konstanta pasut periode 1-31 Agustus 2021(musim timur).

Tabel 4. Elevasi muka air penting tahun 2021 di perairan Teluk Jakarta.

Table 4. Water level elevation of 2021 in the Jakarta Bay waters.

Elevation	Symbol	Equation	Reference	
			MSL (m)	LAT (m)
Highest Astronomical Tide	HAT	$Z_0 + (\text{all constituents})$	0.63	1.26
Higher High Water Level	HHWL	$Z_0 + (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1)$	0.59	1.22
High Water Spring	HWS	$Z_0 + (M_2 + S_2 + K_1 + O_1)$	0.49	1.12
Mean High Water Spring	MHWS	$Z_0 + (M_2 + S_2)$ or $Z_0 + (K_1 + O_1)$	0.09	0.72
Mean High Water Level	MHWL	$Z_0 + (M_2 + K_1 + O_1)$	0.45	1.08
Mean Sea Level	MSL	Z_0	0	0.63
Mean Low Water Level	MLWL	$Z_0 - (M_2 + K_1 + O_1)$	-0.45	0.18
Mean Low Water Spring	MLWS	$Z_0 - (M_2 + S_2)$ or $Z_0 - (K_1 + O_1)$	-0.09	0.54
Chart Datum Level	CDL	$Z_0 - (M_2 + S_2 + K_1 + O_1)$	-0.49	0.14
Lower Low Water Level	LLWL	$Z_0 - (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1)$	-0.59	0.04
Lowest Astronomical Tide	LAT	$Z_0 - (\text{all constituents})$	-0.63	0

3.2. Angin

Pengaruh angin musim yang kuat, ditunjang dengan letak wilayah Indonesia yang berada pada daerah khatulistiwa serta keadaan geografis yang terdiri dari 70% wilayah perairan, menyebabkan Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar (Dida et al., 2016). Hasil analisis angin di perairan Teluk Jakarta pada musim barat menunjukkan bahwa arah angin berfluktuasi hampir dari segala arah, namun yang paling dominan adalah dari barat dan barat laut, dan secara umum kondisi tenangnya sebesar 11,93% (**Gambar 4**). Dominasi arah angin pada musim timur sangat terbalik dengan musim barat, yang mana angin dominan berasal dari arah timur dan nilai tenang yang sangat kecil 0,01%. Hal tersebut menunjukkan pengaruh kuat angin musim dan peranannya sebagai gaya pembangkit arus permukaan di Teluk Jakarta, sehingga pola arus berbeda pada kedua bulan tersebut.

3.3. Gelombang

Tinggi gelombang signifikan di Teluk Jakarta selama tahun 2021 berkisar antara 0,01 - 0,92 m (**Gambar 5**). Secara umum, tinggi gelombang maksimum di Teluk Jakarta selama satu

tahun termasuk kategori tenang ($0,1 - 0,5$ m) dan rendah ($0,5 - 1,25$ m) (BMKG, 2022). Fluktuasi tinggi dan periode gelombang terjadi selama satu tahun seiring dengan perbedaan musim. Perbedaan yang paling terlihat adalah saat musim barat, dengan nilai rata-rata paling tinggi serta tinggi gelombang terkategori rendah pada bulan Januari hingga Februari.

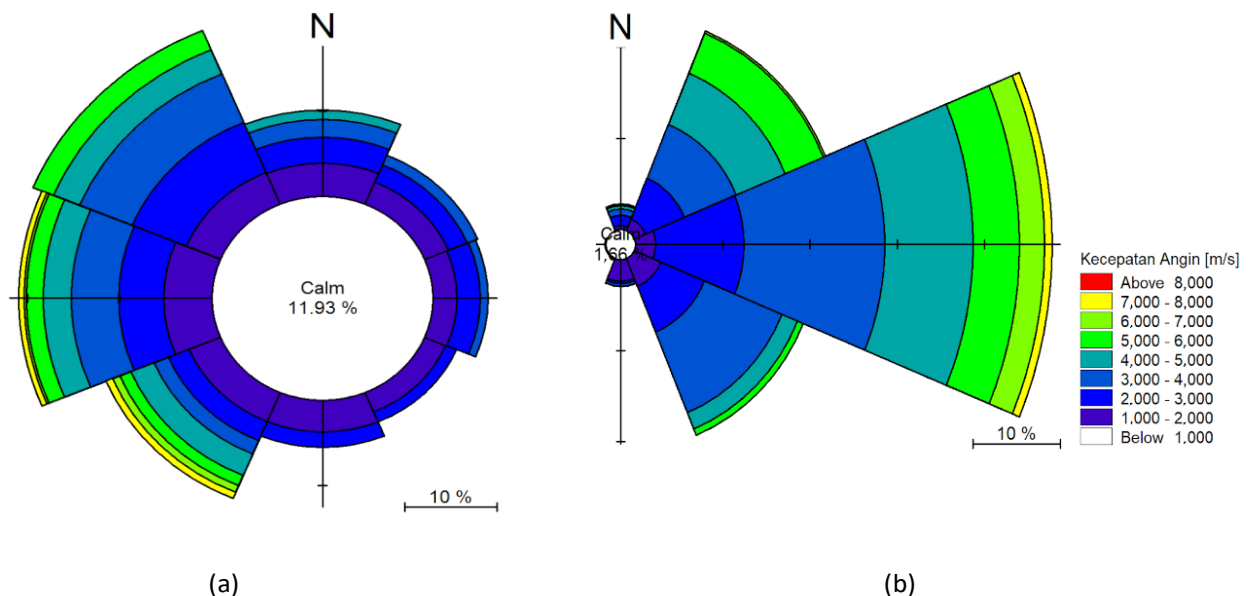


Figure 4. West (a) and east (b) monsoons wind roses of 2021 in the Jakarta Bay.

Gambar 4. Mawar angin musim barat (kiri) dan musim timur (kanan) tahun 2021 di Teluk Jakarta.

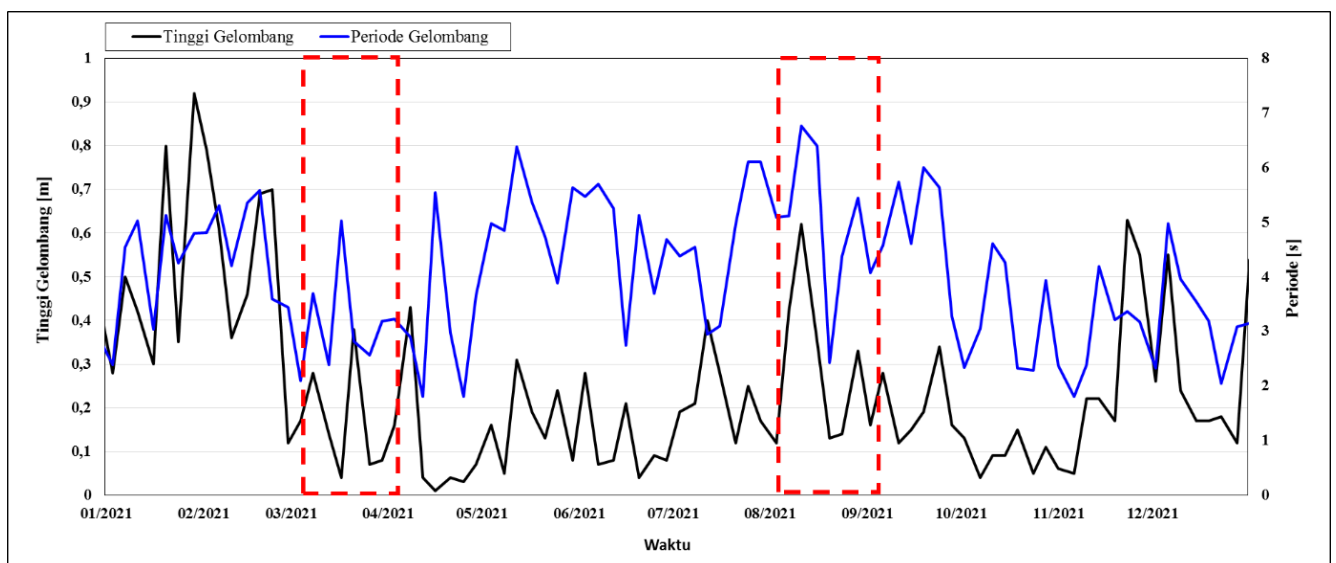


Figure 5. Significant wave periods and heights during 2021 in the Jakarta Bay. The square area represents the field measurement period of the 2021 west and east seasons.

Gambar 5. Periode dan tinggi gelombang signifikan selama tahun 2021 di Teluk Jakarta. Area persegi merupakan periode pengukuran lapangan musim barat dan musim timur 2021.

Pada musim barat, tinggi gelombang berkisar $0,1 - 0,4$ m (**Gambar 6**). Angin musim sebagai salah satu pembangkit gelombang mulai melemah dan bertransisi menjadi musim peralihan. Selanjutnya pada musim timur tinggi gelombang mengalami kenaikan mencapai $0,6$ m (**Gambar 7**). Rezim angin musim timur yang menguat pada bulan ini berkorelasi positif terhadap kenaikan tinggi gelombang, namun nilai tersebut masih lebih rendah

dibandingkan pada musim barat (puncak di bulan Januari). Pada musim barat, angin bergerak dari utara dan langsung masuk ke dalam Teluk Jakarta, sedangkan pada musim timur jarak perjalanan tempuh angin (fetch) terhalang oleh daratan Pulau Jawa (Purwono et al., 2021). Perbedaan wilayah perjalanan angin pada dua periode yang berbeda tersebut menyebabkan perbedaan tinggi gelombang yang dihasilkan pada musim barat dan musim timur. Gelombang lebih tinggi pada musim barat, dibandingkan pada musim timur dan peralihan. Tinggi rendahnya gelombang di Teluk Jakarta sangat berkaitan dengan angin musim yang terjadi di Indonesia, dimana fenomena angin musim yang terjadi di Indonesia berpengaruh terhadap pola arus dan gelombang (Mulsandi et al., 2024; Ramadhan et al., 2024).

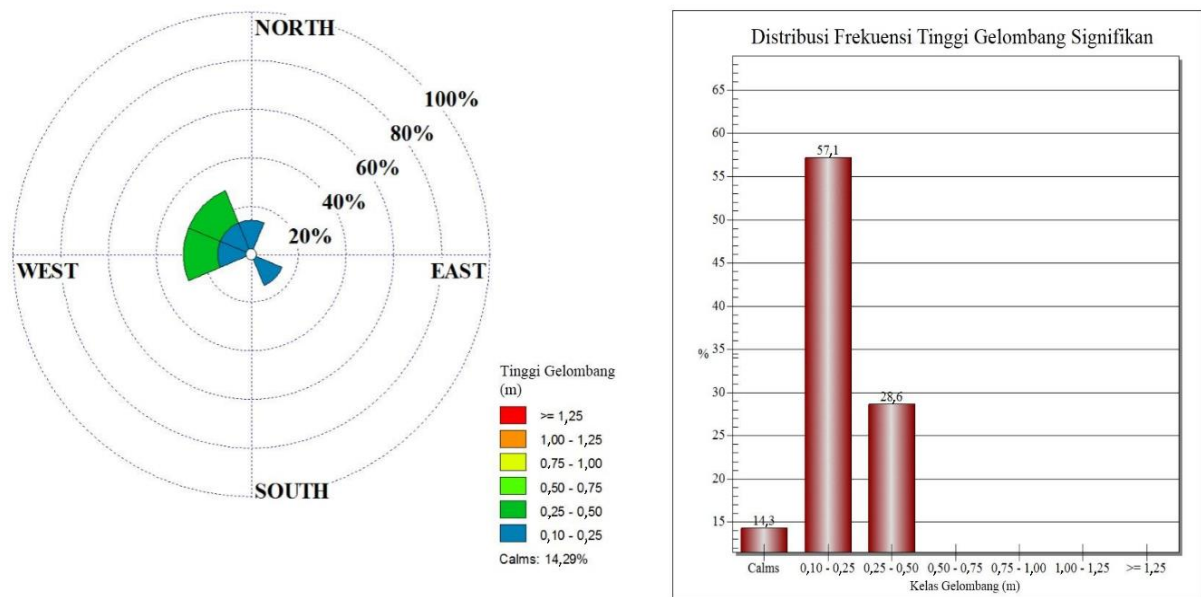


Figure 6. Characteristics of significant waves in the 2021 west monsoon. (left) Wave rose; (right) Wave high frequency distributions.

Gambar 6. Karakteristik gelombang signifikan pada musim barat tahun 2021. (kiri) Mawar gelombang (waverose); (kanan) Distribusi frekuensi tinggi gelombang.

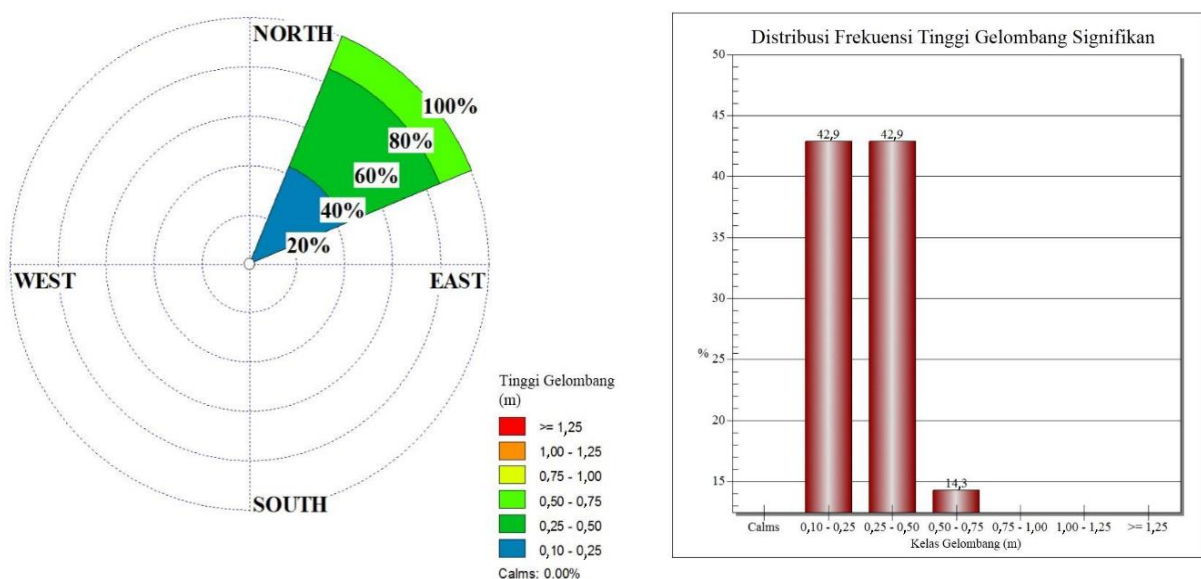


Figure 7. Characteristics of significant waves in the 2021 eastern season. (left) Wave rose; (right) Wave high frequency distributions.

Gambar 7. Karakteristik gelombang signifikan pada musim timur tahun 2021. (kiri) Mawar gelombang (waverose); (kanan) Distribusi frekuensi tinggi gelombang.

3.4. Validasi Arus dan Elevasi Muka Air (Pasut) Hasil Pengukuran dan Model

Validasi hasil model hidrodinamika arus dan pasang surut secara matematik disajikan melalui diagram Taylor (Sotillo et al., 2021) (**Gambar 8**) yang menunjukkan nilai RMSE, standar deviasi, dan korelasi. Selain itu, validasi pasang surut juga disajikan dalam grafik garis (Gambar 9 dan 10) dan diagram pencar untuk komponen arus zonal dan meridional (Gambar 11). Nilai RMSE hasil diagram Taylor untuk parameter pasang surut menunjukkan 0,074 pada musim barat dan 0,042 pada musim timur, sedangkan RMSE arus pada musim barat untuk komponen u dan v berturut turut sebesar 0,0279 dan 0,0392, serta 0,0298 dan 0,0259 pada musim timur.

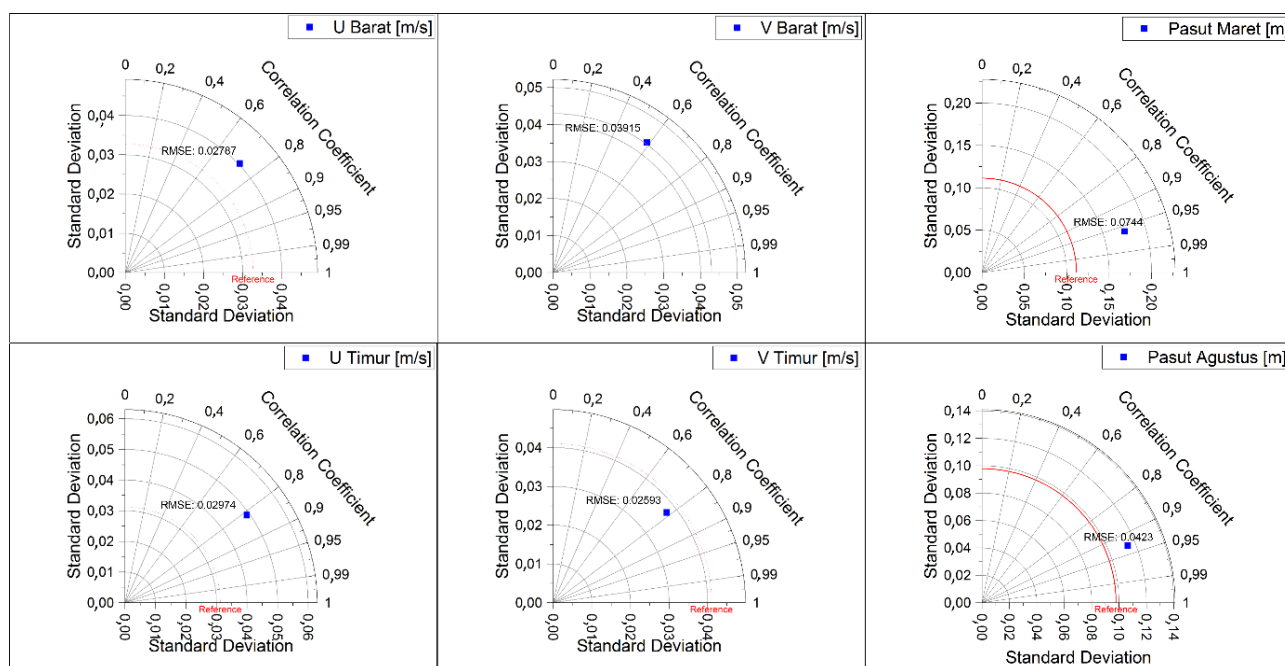


Figure 8. Taylor diagrams of u - v current components and tidal validation of west and east seasons.

Gambar 8. Diagram Taylor untuk validasi arus pada komponen u dan v , serta validasi pasut, pada musim barat dan timur.

Berdasarkan pola fluktuasi pasang surut, pola pasut hasil pengukuran lapangan dan hasil model menunjukkan pola atau tren yang sama, baik saat periode pengukuran musim barat (**Gambar 9**) maupun periode pengukuran musim timur (**Gambar 10**). Secara matematik, validasi elevasi muka air (pasut) dengan hasil pengukuran lapangan menggunakan RMSE menunjukkan hasil 0,2 untuk musim barat dan 0,1 untuk musim timur. Nilai tersebut menunjukkan validasi yang baik untuk musim barat dan sangat baik untuk musim timur (Seiler et al., 2015), hal ini mengartikan bahwa pasut hasil model dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan.

Validasi arus hasil model dengan data pengukuran lapangan secara sederhana disajikan dalam bentuk diagram pencar (**Gambar 11**). Setiap titik yang terdapat pada gambar mewakili arah zonal (u , barat-timur) dan meridional (v , utara-selatan). Kedua hasil menunjukkan pola atau tren arus yang sama, baik saat periode pengukuran musim barat maupun periode pengukuran musim timur. Validasi arus hasil model dengan pengukuran lapangan menggunakan RMSE menunjukkan hasil yang sama untuk kedua periode waktu yaitu 0,4. Nilai tersebut menunjukkan bahwa arus hasil model dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan, dengan kategori baik menurut Seiler et al. (2015).

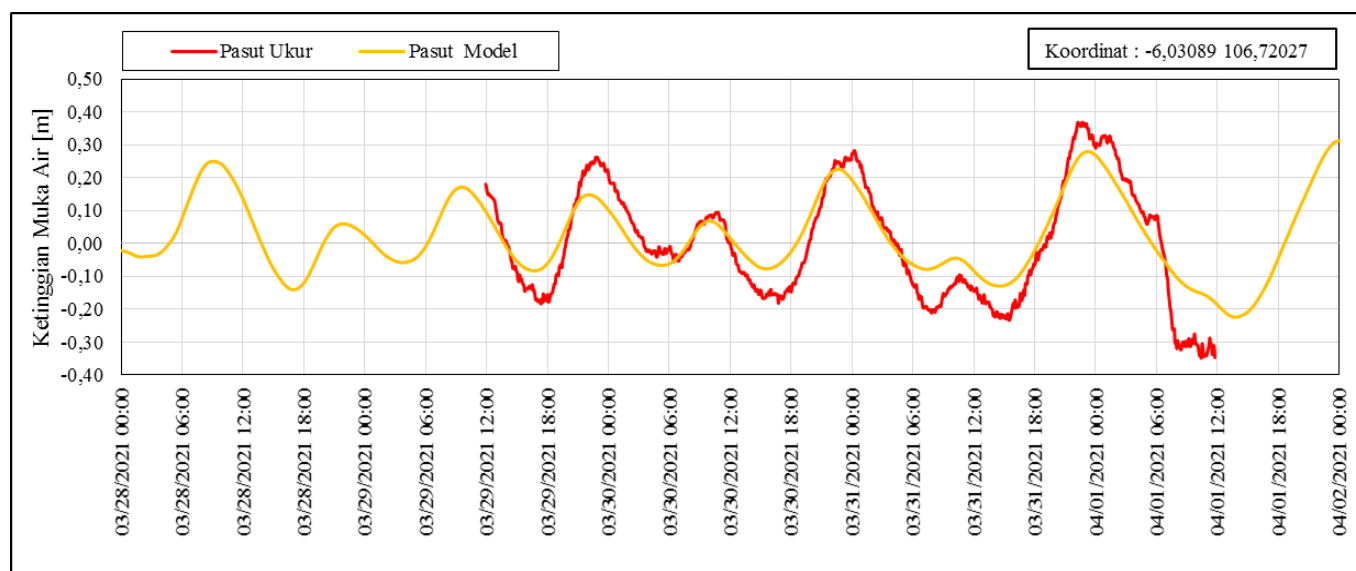


Figure 9. Validation of water surface elevation, based on model and field measurement data, in March-April 2021 (west season).

Gambar 9. Validasi elevasi muka air hasil model terhadap data hasil pengukuran lapang, pada bulan Maret-April tahun 2021(musim barat).

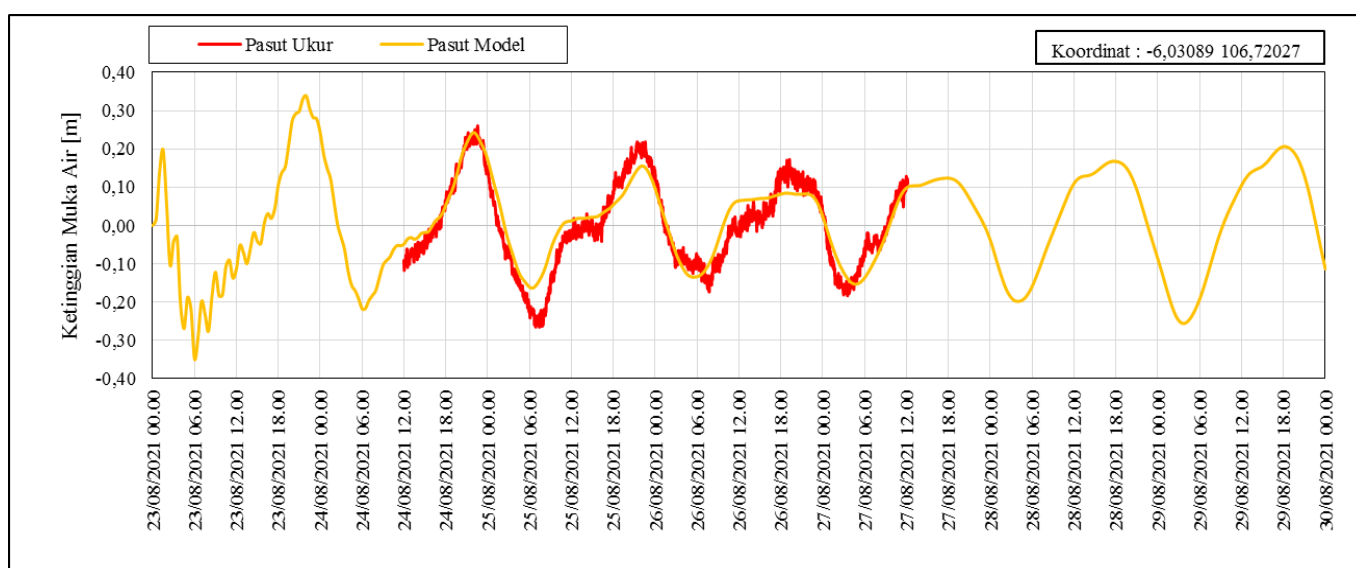
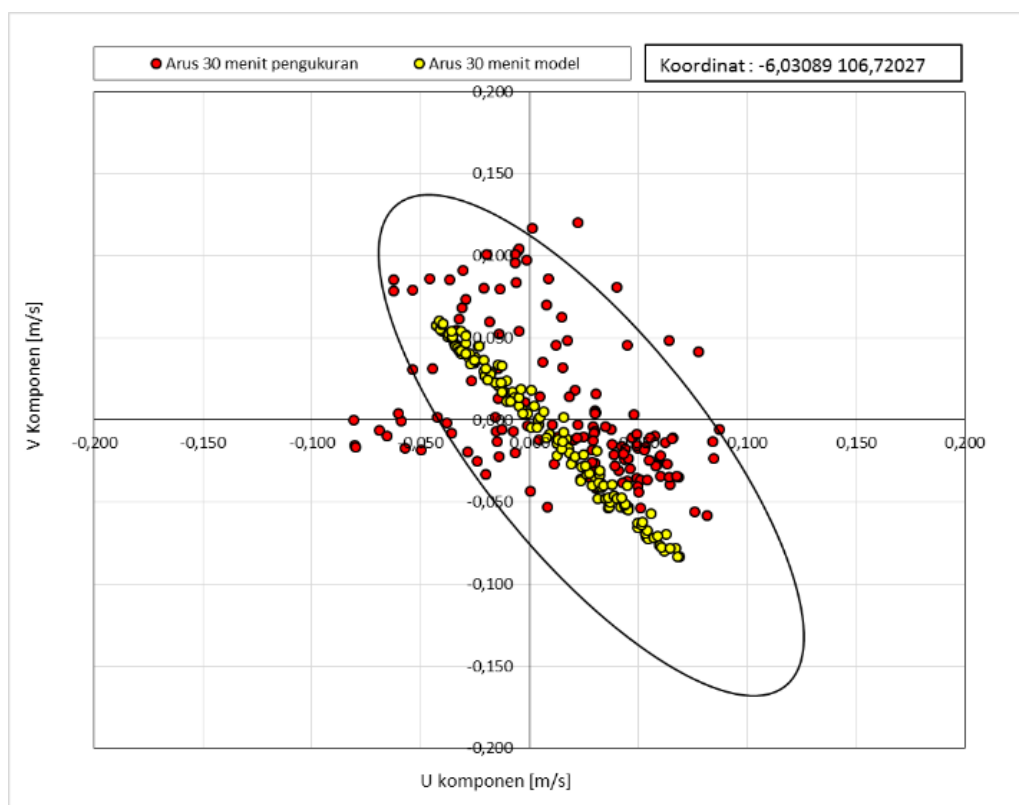
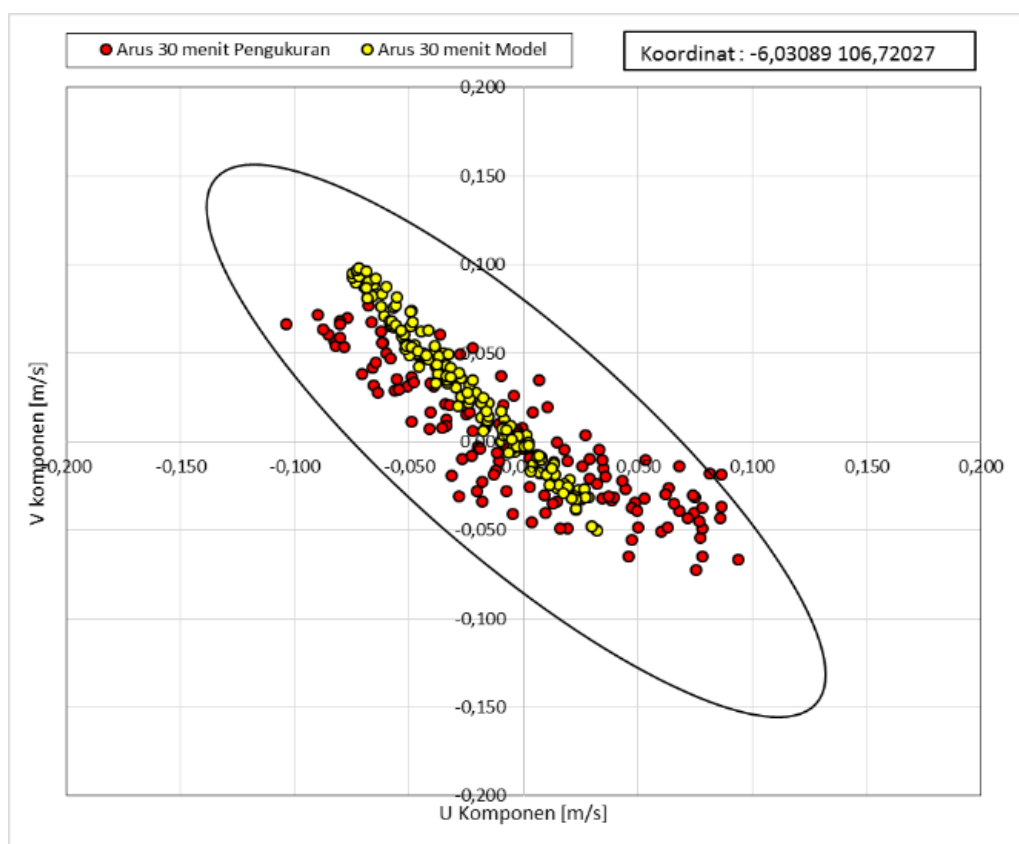


Figure 10. Validation of water surface elevation, based on model and field measurement data, in August 2021 (east season).

Gambar 10. Validasi elevasi muka air hasil model terhadap data hasil pengukuran lapang, pada bulan Agustus tahun 2021(musim timur).



(a)



(b)

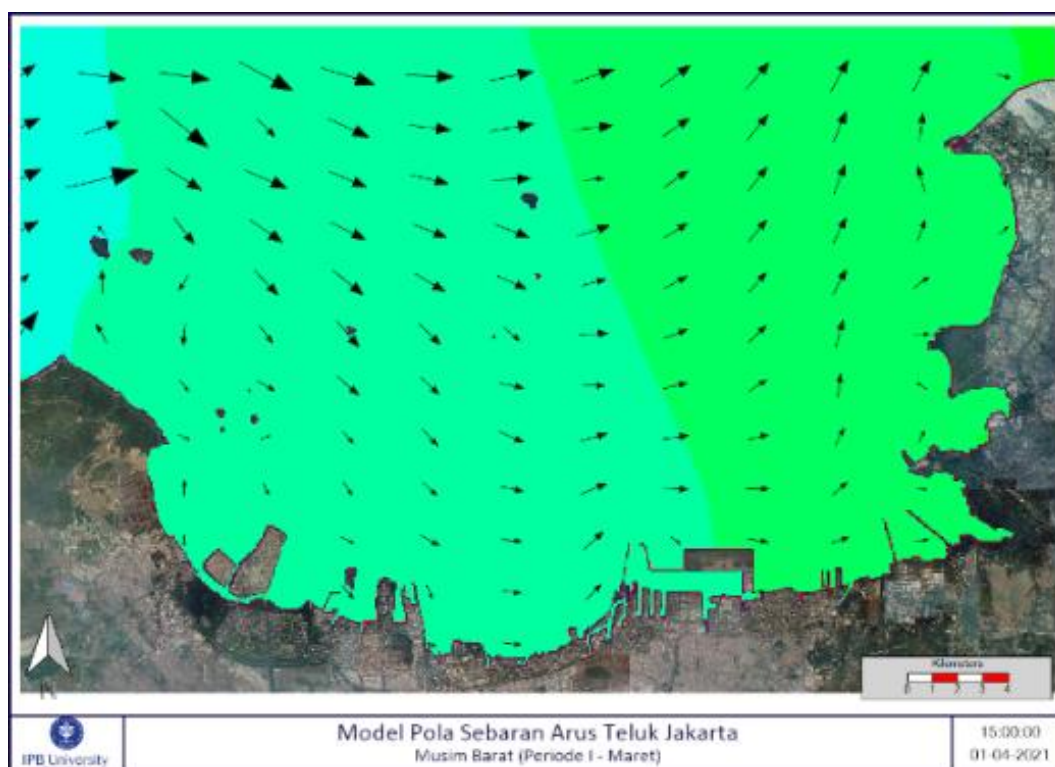
Figure 11. Scatter diagram of currents validation in the west (a) and east (b) seasons.

Gambar 11. Diagram pencar validasi arus pada musim barat (a) dan musim timur (b).

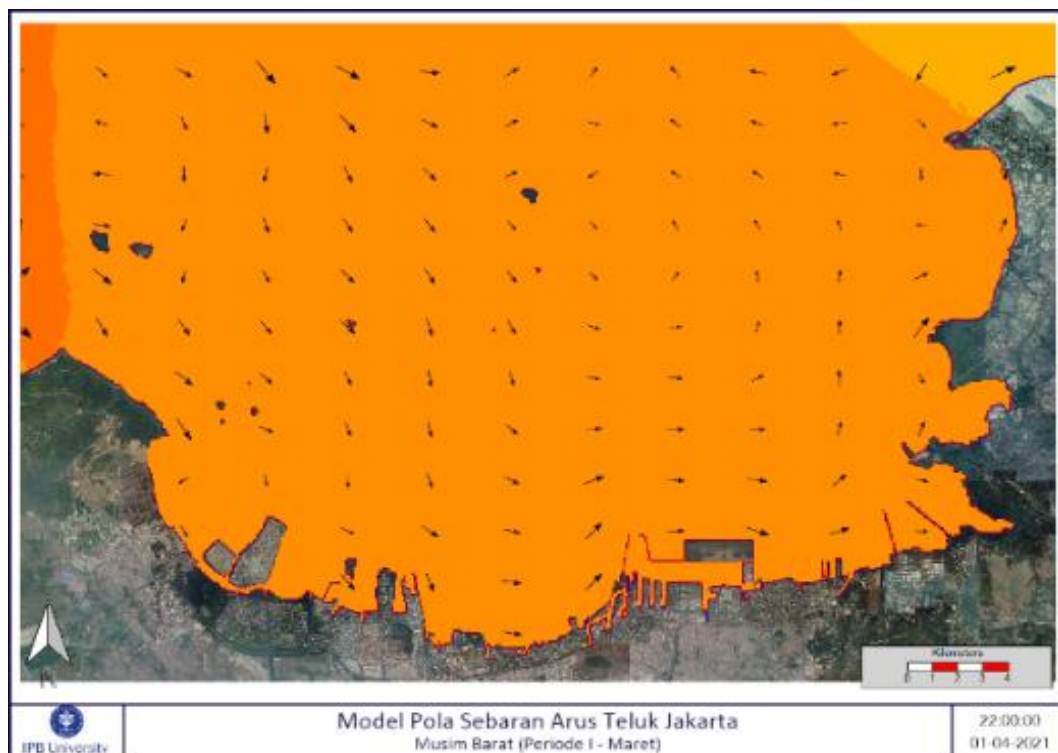
3.5. Pola Arus pada Musim Barat dan Musim Timur

Pola arus hasil simulasi pada kedua musim digambarkan pada empat kondisi pasang surut yaitu menuju pasang (A), puncak pasang (B), menuju surut (C), dan puncak surut (D) (**Gambar 12**) dan (**Gambar 13**). Penyajian hasil berupa stick plot arus yang di-overlay dengan elevasi muka air. Pada musim barat fase menuju pasang (**Gambar 12A**) stik plot arus mengarah ke dalam teluk dengan kecepatan 0,15 m/s dengan arah Barat ke Timur, sedangkan pada musim timur (**Gambar 13A**) dengan nilai kecepatan yang sama arus masuk kedalam teluk dengan arah Timur ke Barat. Pada fase puncak pasang (B) baik pada musim barat maupun timur memiliki nilai arus yang tenang, terlihat juga elevasi air yang lebih tinggi yang menandakan bahwa pois air lebih tinggi. Fase menuju surut musim barat (**Gambar 12C**) arus bergerak dari Timur ke Barat, sedangkan pada musim timur (**Gambar 13C**) pola arus bergerak dari Barat ke Timur, keduanya memiliki kecepatan yang identik. Pada fase puncak surut (D) baik pada musim barat maupun timur memiliki nilai arus yang tenang kembali. Terjadi perbedaan pola arus di semua fase yang terjadi pada musim barat dan musim timur, hal ini karena dalam simulasi model memperhitungkan input angin yang berhembus pada masing - masing bulan, sehingga terjadi perbedaan pola arus meskipun dalam kondisi yang sama.

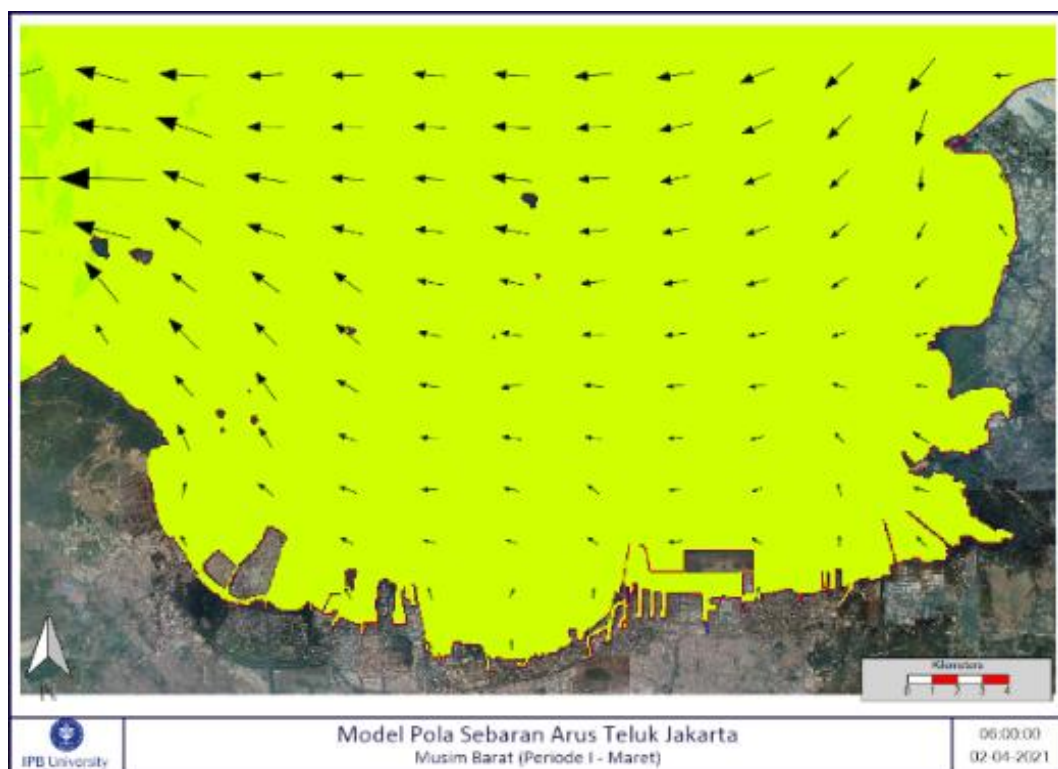
Pola arus yang terbentuk di Teluk Jakarta pada simulasi periode pertama (musim barat) **Gambar 12**, dengan kisaran kecepatan 0,01 – 0,20 m/s. Sedangkan pada simulasi periode kedua (musim timur) **Gambar 13** kecepatan arus berkisar antara 0,01 - 0,15 m/s. Pola arus yang terbentuk pada kedua musim di bagian dalam teluk cenderung lebih tenang, dengan kecepatan 0,07 m/s, membentuk pusaran-pusaran kecil. Kecepatan arus di wilayah pesisir bagian barat dan timur Teluk Jakarta memiliki perbedaan, dimana pada area timur Teluk Jakarta yaitu wilayah Muara Gembong, Cilincing, dan Citarum kecepatan arus menunjukkan nilai 0,10 m/s, sementara bagian barat Teluk Jakarta seperti di wilayah Cengkareng Drain dan Muara Kamal kecepatan arus terlihat tenang dengan nilai 0,01 m/s hingga 0,02 m/s. Kisaran nilai kecepatan arus hasil pemodelan di dalam teluk pada kondisi pasang menunjukkan nilai yang mirip dengan penelitian sebelumnya oleh Surya (2019) dan Arifin (2015), pada kondisi pasut yang sama, yaitu 0,02 – 0,07 m/s.



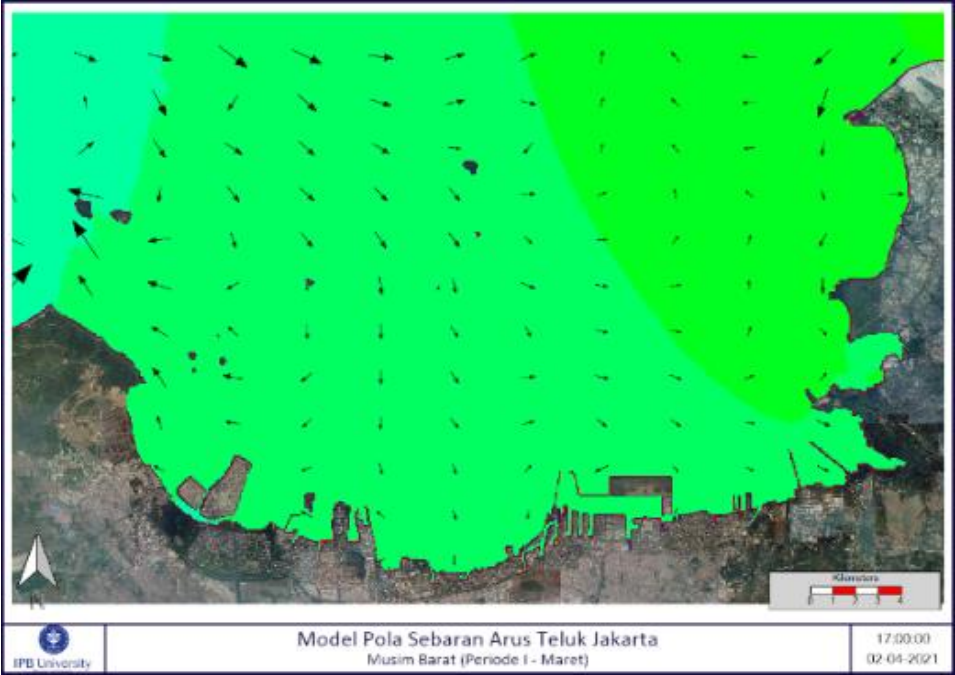
(a)



(b)



(c)



(d)

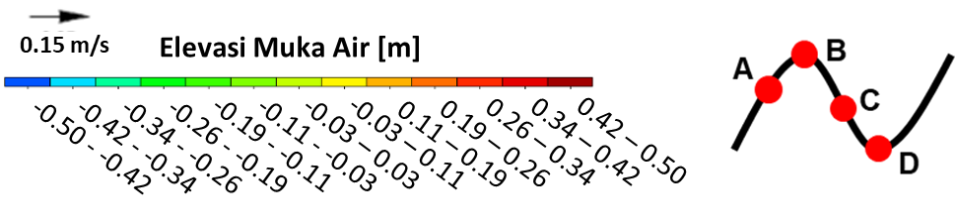
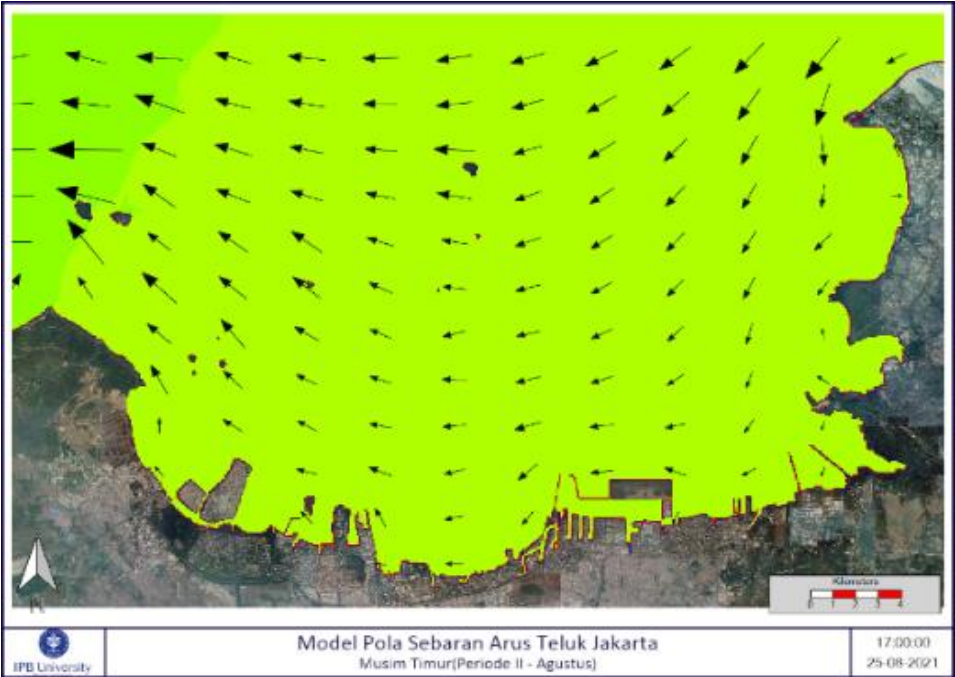
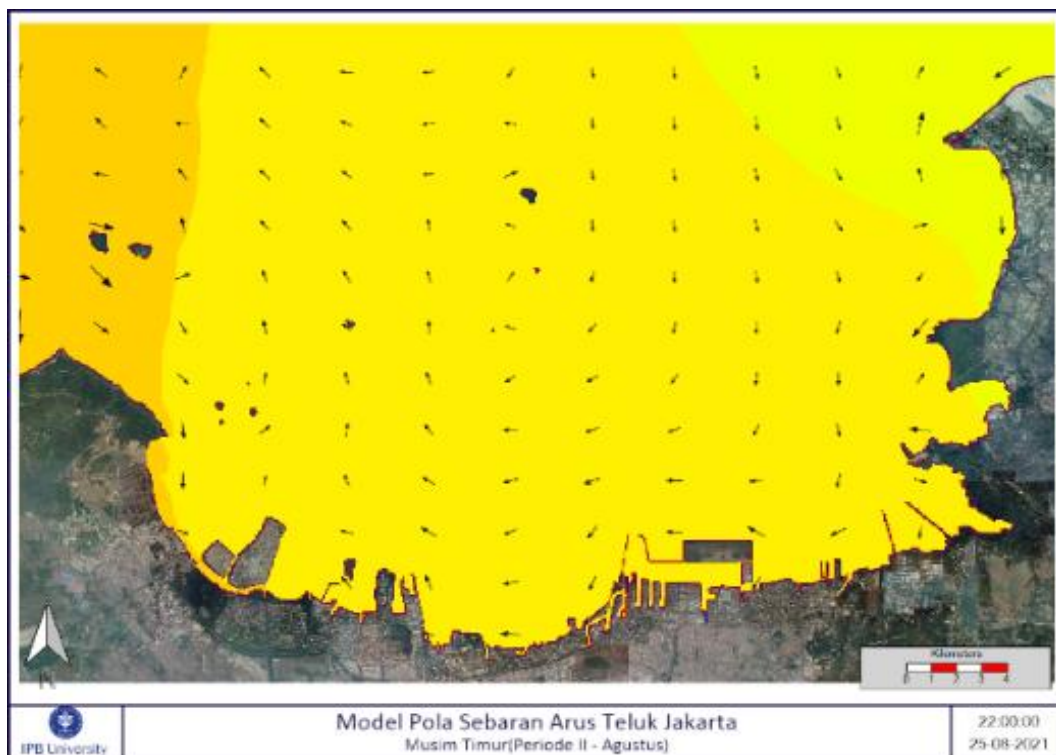


Figure 12. Patterns of current circulation based on tidal condition of west season. A) toward flood, B) peak of flood, C) toward ebb, and D) peak of ebb.

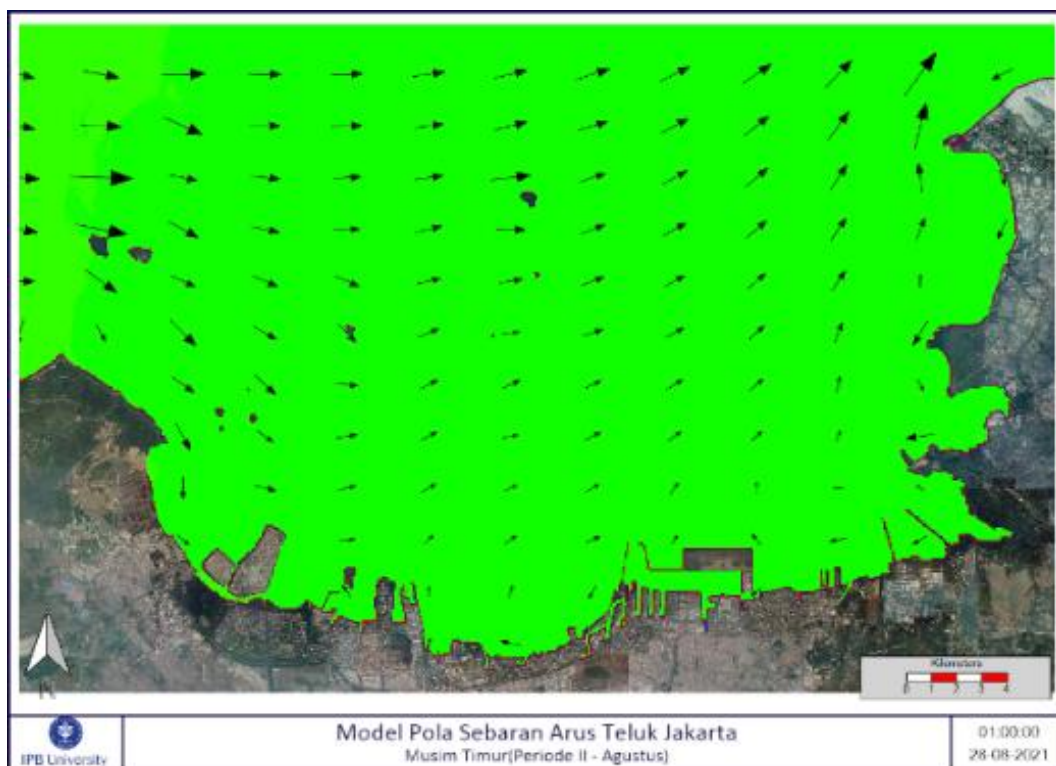
Gambar 12. Pola sirkulasi arus pada setiap kondisi pasang surut periode pertama (musim barat). A) menuju pasang, B) puncak pasang, C) menuju surut, dan D) puncak surut.



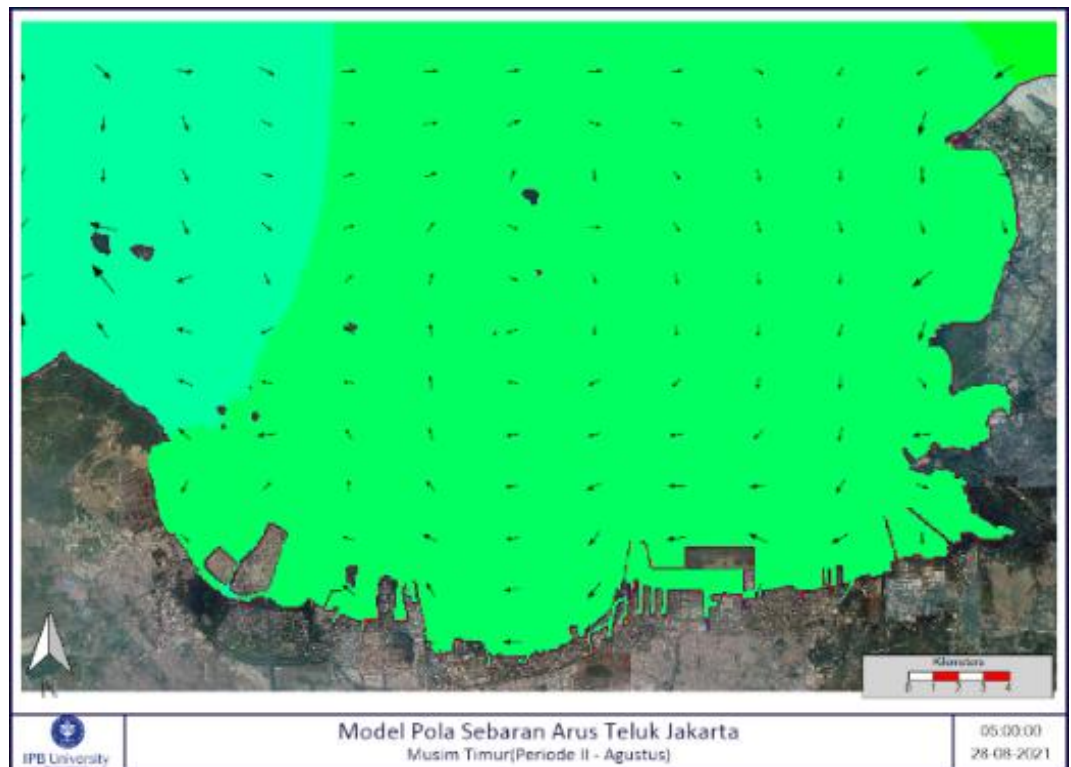
(a)



(b)



(c)



(d)

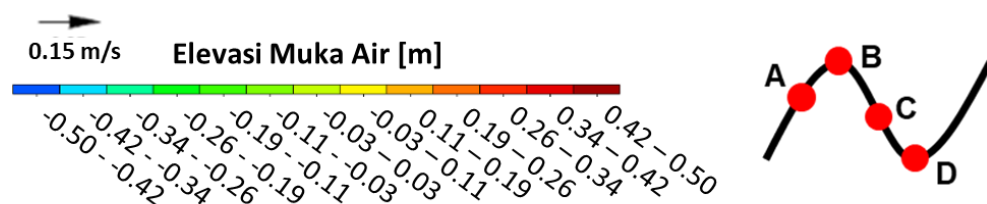


Figure 13. Patterns of current circulation based on tidal condition of east season. A) toward flood, B) peak of flood, C) toward ebb, and D) peak of ebb.

Gambar 13. Pola sirkulasi arus pada setiap kondisi pasang surut periode kedua (musim timur). A) menuju pasang, B) puncak pasang, C) menuju surut, dan D) puncak surut.

Pada hasil simulasi musim barat, ditampilkan arus residual (gambar 14) untuk menggambarkan karakteristik sirkulasi aliran di Teluk Jakarta. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arah arus dominan bergerak dari arah barat menuju timur sejalan dengan angin musim barat yang masih berlangsung dan mendominasi pola arus. Kecepatan arus tinggi berkisar antara 0,20 – 0,30 m/s yang terletak di bagian utara Teluk Jakarta. Sementara itu pada bagian dalam teluk, aliran arus terlihat lebih tenang namun tetap mempertahankan orientasi arah ke timur. Hasil simulasi musim timur (gambar 15) menunjukkan kecepatan arus residu, terlihat lebih lemah dengan arah dominan ke barat. Hampir seluruh area studi mengalami perlambatan kecepatan arus dengan arah arus menuju timur. Kecepatan arus bervariasi dari 0,001 m/s hingga 0,008 m/s. Hal ini sejalan dengan Setiayadi et al 2024, bahwa arus di Teluk Jakarta pada musim timur bergerak dari timur ke barat dan pada musim barat dari barat ke timur. Berdasarkan hasil simulasi, terdapat area di Teluk Jakarta yang baik pada musim barat maupun musim timur, menunjukkan pola arus yang lemah atau stagnan. Area ini berada di sekitar muara sungai besar seperti Sungai Kamal, Cengkareng Drain, Sunter, Bekasi, dan Muara Gembong. Lemahnya arus di wilayah tersebut menyebabkan rendahnya kapasitas pengangkutan sedimen, sehingga muatan padat dari sungai cenderung mengendap di muara. Kondisi ini berpotensi menyebabkan akumulasi sedimen secara bertahap, yang dalam jangka panjang dapat memicu proses pendangkalan.

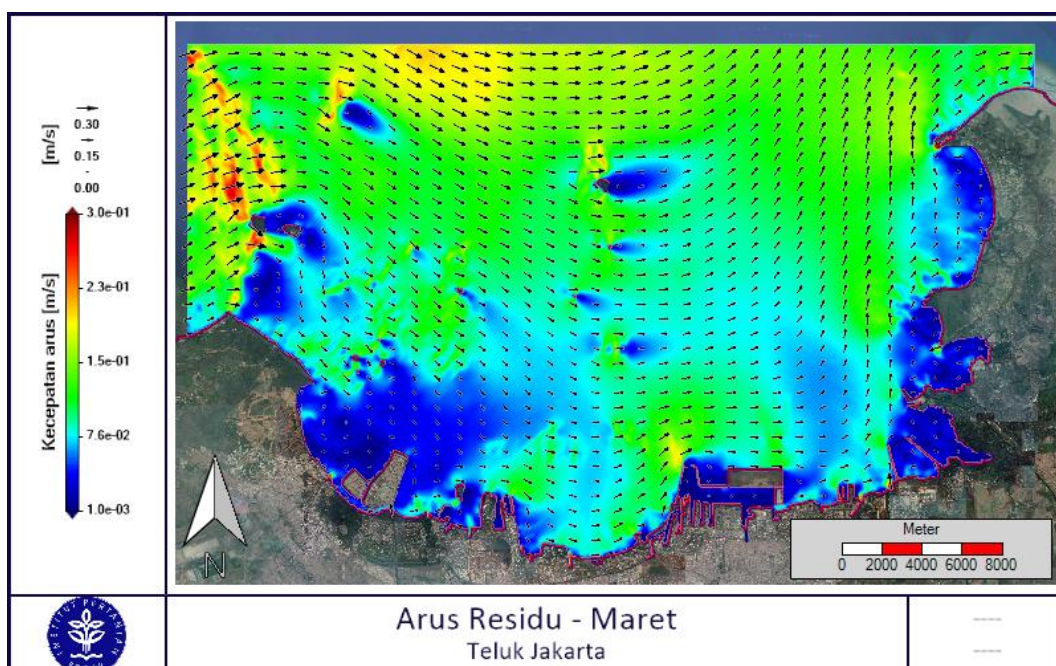


Figure 14. Residual current patterns during model simulations (2021) of west monsoon.

Gambar 14. Pola arus residu selama simulasi model di musim barat 2021.

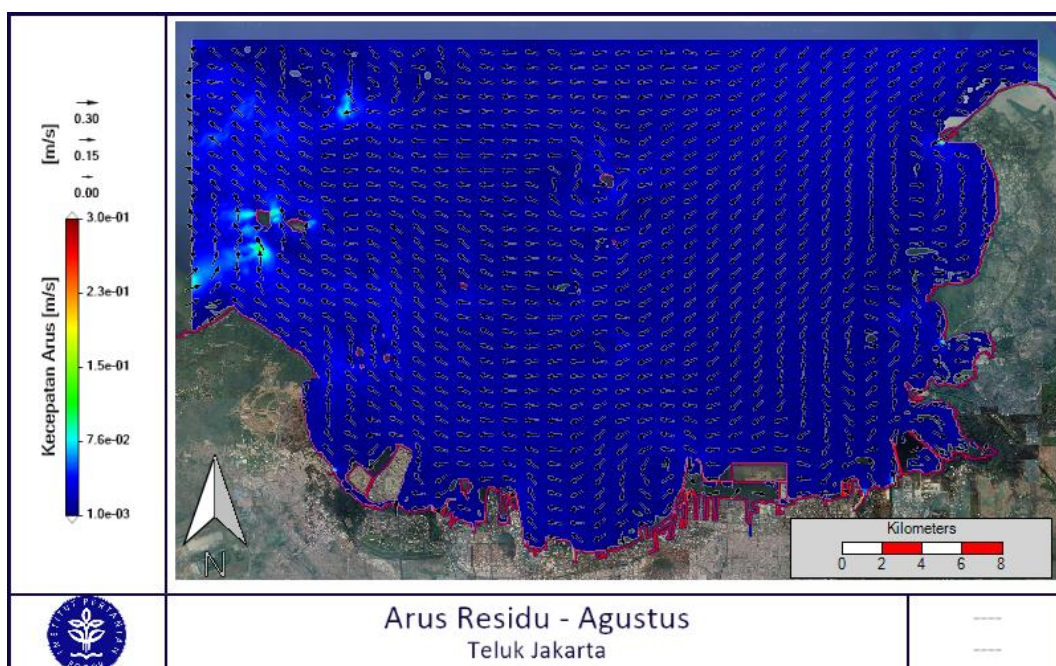


Figure 15. Residual current patterns during model simulations (2021) of east monsoon.

Gambar 15. Pola arus residu selama simulasi model di musim timur 2021.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pola sirkulasi arus di Teluk Jakarta sangat dipengaruhi oleh pola musiman dari Laut Jawa. Pada bulan maret arus residu umumnya mengalir dari barat ke timur dengan kecepatan yang relatif lebih tinggi, sedangkan pada bulan agustus arus bergerak dari timur ke barat dengan intensitas yang lebih lemah. Perbedaan ini mencerminkan dampak angin musiman terhadap dinamika arus di wilayah Teluk Jakarta. Validasi hasil pemodelan dengan data observasi menunjukkan kesesuaian yang baik, hal ini menandakan bahwa model hidrodinamika OpenFlows mampu merepresentasikan kondisi lapangan secara akurat.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih diberikan kepada Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, Pusat Studi Bencana IPB, dan Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan (PKSPL) dalam menunjang kegiatan survei dan memperkenankan saya untuk mengikuti kegiatan “Pemantauan Kualitas Lingkungan Perairan Laut dan Muara Teluk Jakarta”. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada tim survei oseanografi dari Laboratorium Oseanografi ITK IPB yang membantu proses pengukuran data observasi.

Daftar Pustaka

- Ahmad, R., Hendri, A., & Fauzi, M. (2017). Pengaruh simulasi awal data pengamatan terhadap efektivitas prediksi pasang surut metode Admiralty (studi kasus pelabuhan Dumai). *JOM FTEKNIK*, 4(2), 1–10. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/16559>
- Amalina, A. D., Atmojo, W., & Pranowo, W. S. (2019). Karakteristik pasang surut di Teluk Jakarta berdasarkan data 253 bulan. *Jurnal Riset Jakarta*, 12(1), 25–36. <https://doi.org/10.37439/jurnaldrd.v12i1.7>
- Atmadipoera, A. S., Kusmanto, E., Purwandana, A., & Nurjaya, I. W. (2015). Observation of coastal front and circulation in the northeastern Java Sea, Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1), 91–108. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v7i1.9786>
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). (2022). *Pusat Meteorologi Maritim: Kondisi Wilayah Perairan Indonesia*. <https://maritim.bmkg.go.id>
- Choubin, B., Darabi, H., Rahmati, O., Sajedi-Hosseini, F., & Kløve, B. (2018). River suspended sediment modeling using the CART model: A comparative study of machine learning techniques. *Science of The Total Environment*, 615, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.293>
- Contreras-Tereza, V. K., Salas-de-Leon, D. A., Monreal-Jimenez, R., & Monreal-Gomez, M. A. (2021). The 2010 Gulf of Mexico oil spill: A modeling study. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06959-x>
- de Pablo, H., Sobrinho, J., Garcia, M., Campuzano, F., Juliano, M., & Neves, R. (2019). Validation of the 3D-MOHID hydrodynamic model for the Tagus coastal area. *Water*, 11(1713), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w11081713>
- de Pablo, H., Sobrinho, J., Garaboa-Paz, D., Fonteles, C., Neves, R., & Gaspar, M. B. (2022). The influence of the river discharge on residence time, exposure time and integrated water fractions for the Tagus estuary (Portugal). *Frontiers in Marine Science*, 8, 734814. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.734814>
- Dida, H. P., Suparman, S., & Widhiyanuriyawan, D. (2016). Pemetaan potensi energi angin di perairan Indonesia berdasarkan data satelit QuikScat dan Windsat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2), 95–101. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2016.007.02.7>
- Fadika, U., Rifai, A., & Rochaddi, B. (2017). Arah dan kecepatan angin musiman serta kaitannya dengan sebaran suhu permukaan laut di selatan Pangandaran Jawa Barat. *Jurnal Oseanografi*, 3(3), 429–437. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/5881>
- Franz, G., Garcia, C. A. E., Pereira, J., Assad, L. P. F., Rollnic, M., Garbossa, L. H. P., ... & Polejack, A. (2021). Coastal ocean observing and modeling systems in Brazil: Initiatives and future perspectives. *Frontiers in Marine Science*, 8, 681619. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681619>
- Garbossa, L. H. P., dos Santos, A. A., & Lapa, K. R. (2021). Seaweed dispersion under different environmental scenarios based on branches settling velocity and hydrodynamic Lagrangian model. *Regional Studies in Marine Science*, 47, 101909. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101909>

- Hasriyanti. (2015). Tipe gelombang dan pasang surut di perairan Pulau Dutungan Kabupaten Barru Sulawesi Selatan. *Jurnal Sainsmat*, 4(1), 14–27. <https://doi.org/10.35580/sainsmat4112812015>
- Hermansyah, H., Ningsih, N. S., Nabil, Tarya, A., & Syahrudin. (2020). Numerical modeling of tidal current patterns using 3-dimensional MOHID in Balikpapan Bay, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 12(1), 9–20. <https://doi.org/10.20473/jipk.v12i1.16257>
- Huguet, J. R., Brenon, I., & Coulombier, T. (2020). Influence of floating structures on tide- and wind-driven hydrodynamics of a highly populated Marina. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(2), 05019004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000549](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000549)
- Jackson, M., Fossati, M., & Solari, S. (2022). Sea levels dynamical downscaling and climate change projections at the Uruguayan coast. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.846396>
- Jasmin, M. M., Purba, N. P., Pranowo, W. S., Pribadi, T. D. K., Syamsudin, M. L., & Ihsan, Y. N. (2020). Marine macro debris transport based on hydrodynamic model before and after reclamation in Jakarta Bay, Indonesia. *Malaysian Journal of Applied Sciences*, 5(2), 100–111. <http://dx.doi.org/10.37231/myjas.2020.5.2.241>
- Kurdi, H., Fitrianti, U., Najib, A. N., & Isramaulana, A. (2019). Perubahan terjadinya puncak pasang surut Sungai Barito akibat pemanasan global. *Info Teknik*, 20, 71–80. <http://dx.doi.org/10.20527/infotek.v20i1.6960>
- Kurniawan, A., Egon, A., Sujatmiko, K. A., & Malakani, A. I. (2022). Hydrodynamic modelling of tidally-influenced fluvial zone: A study case of Palembang, Indonesia. *Indonesian Journal of Marine Sciences*, 27(1), 83–92. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.27.1.83-92>
- Lubis, A. Z., & Kinseng, R. A. (2020). Transformasi sosial nelayan di Teluk Jakarta. *Jurnal Masyarakat dan Budaya*, 22(1), 25–40. <https://doi.org/10.14203/jmb.v22i1.564>
- Maharani, T. N. (2022). Pemetaan pasang surut dan kontur batimetri menggunakan data satelit altimetri. *Jurnal Geodesi Undip*, 11(1), 23–32. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/32561>
- Masrur, M., Harto, A. B., & Setiawan, R. Y. (2020). Studi potensi pasang surut sebagai pembangkit listrik tenaga gelombang di perairan Selat Lampa Kabupaten Natuna. *Jurnal Teknik ITS*, 9(1), A56–A61. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i1.57845>
- Maulana, M. I., Suwarno, S., & Yuliadi, L. (2022). Pola arus permukaan dan konsentrasi klorofil-a di wilayah perairan Teluk Palu. *Jurnal Segara*, 18(1), 35–44. <https://doi.org/10.15578/segara.v18i1.10798>
- Mufid, R. F., Pranowo, W. S., Yulistiyanto, B., & Sugianto, D. N. (2020). Pemodelan sebaran limbah cair dari kawasan industri Cilacap menggunakan pendekatan numerik. *Jurnal Oseanografi*, 9(2), 142–150. <https://doi.org/10.14710/jo.9.2.142-150>
- Nurdin, H. (2017). Pemodelan pasang surut dan arus di Selat Lampa, Kabupaten Natuna. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(1), 25–34. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v9i1.10684>
- Nurfauzi, R., Purba, N. P., Pranowo, W. S., & Dwisusanto, Y. (2021). Numerical modeling of sediment transport in Benoa Bay, Bali: A case study of reclamation impact. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794, 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012104>
- Octaviani, M., & Rani, C. F. (2020). Studi variasi pasang surut pada beberapa stasiun pasut di Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(2), 451–460. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i2.32134>
- Purba, N. P., Wibowo, W. T., & Pranowo, W. S. (2021). Hydrodynamic simulation and pollutant distribution of Jakarta Bay: Implication to marine debris modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794, 012068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012068>
- Purnomo, H., Prayuda, Y. R., Sari, R. M., & Mahardika, A. D. (2022). Studi numerik pola arus permukaan dan sebaran suhu permukaan laut di Selat Sunda. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(2), 499–509. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i2.41461>
- Ramadhan, R., Astari, R., & Pranowo, W. S. (2019). Simulasi numerik model hidrodinamika pasang surut di Teluk Jakarta menggunakan MIKE 21. *Jurnal Segara*, 15(2), 69–78. <https://doi.org/10.15578/segara.v15i2.6979>

- Ramli, R., Harto, A. B., & Masrur, M. (2021). Analisis potensi energi arus laut sebagai pembangkit listrik tenaga laut di perairan Selat Bali. *Jurnal Teknik ITS*, 10(1), A47–A52. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i1.76131>
- Rifai, A., Suprihanto, H., & Wibisono, M. Y. (2018). Pola arus pasang surut dan sebaran klorofil-a di perairan utara Jakarta. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(2), 457–468. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v10i2.22790>
- Sari, R. M., Pranowo, W. S., & Syamsudin, M. L. (2022). Evaluasi kinerja model numerik 3D untuk memodelkan arus pasang surut di perairan pesisir timur Sumatera. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(1), 87–96. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i1.38192>
- Sasongko, R. A., & Wahyudi, R. (2018). Simulasi penyebaran limbah domestik menggunakan model numerik di Teluk Jakarta. *Jurnal Teknik ITS*, 7(2), A209–A214. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v7i2.31293>
- Sugianto, D. N., Wibowo, W. T., & Pranowo, W. S. (2020). Simulasi numerik dampak reklamasi terhadap dinamika arus di Teluk Jakarta. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(2), 385–396. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i2.32130>
- Sulaiman, A. I., Widodo, A., & Wibisono, M. Y. (2017). Analisis pasang surut dan arus pasut di perairan pantai utara Jawa Barat. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), A121–A126. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.21744>
- Suratman, A. (2019). Dinamika pasang surut dan arus laut di Selat Makassar. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 11(1), 117–125. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v11i1.25890>
- Sutrisno, E., Taryana, Y., & Darmawan, F. (2021). Pemodelan arus laut di perairan utara Jawa Timur menggunakan MIKE 21. *Jurnal Segara*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.15578/segara.v17i1.9600>
- Syamsuddin, M. L., Pranowo, W. S., & Adyasari, D. (2020). Simulasi numerik arus permukaan laut dan distribusi massa air di perairan Kalimantan Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(2), 377–384. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i2.32129>
- Syamsuddin, M. L., Pranowo, W. S., & Nugroho, D. (2017). Pemodelan numerik arus laut dan distribusi suhu permukaan laut di perairan utara Jawa. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(1), 15–24. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v9i1.10683>
- Tamtomo, K. H., & Susilo, E. (2021). Pengaruh pasang surut terhadap penyebaran polutan di kawasan pelabuhan menggunakan model MIKE 21. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), A312–A317. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.91430>
- Utama, Y., & Salim, H. S. (2018). Studi arus pasang surut dan distribusi sedimen tersuspensi di perairan muara sungai menggunakan model MIKE 21. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(1), 35–46. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v10i1.22785>
- Wahyudi, R., & Nugroho, D. (2020). Simulasi arus laut pasang surut dan sebaran limbah domestik di Teluk Palu. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(1), 45–56. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i1.29138>
- Wibisono, M. Y., & Pranowo, W. S. (2021). Evaluasi model numerik dalam simulasi arus laut di perairan pantura Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(1), 123–134. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i1.36113>
- Widodo, A., & Harto, A. B. (2020). Potensi energi arus laut di perairan Selat Lombok sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), A147–A152. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.57913>
- Yani, A., & Prayuda, Y. R. (2021). Studi numerik pasang surut dan arus laut di wilayah pesisir barat Sumatera menggunakan MIKE 21. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(2), 231–240. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i2.37915>
- Yunita, D., & Adyasari, D. (2022). Dinamika pasang surut dan sebaran salinitas di perairan Delta Mahakam. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(1), 109–119. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i1.39165>
- Zamroni, A., Susilo, E., & Nurul, H. (2019). Simulasi sebaran tumpahan minyak menggunakan model MIKE 21 di perairan Balikpapan. *Jurnal Teknik ITS*, 8(1), A25–A30. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i1.46492>