
**PEMODELAN DINAMIKA ARUS PERMUKAAN LAUT ALUR PELAYARAN BARAT
SURABAYA**
**MODELLING THE DYNAMIC OF SEA SURFACE CURRENT OF THE WEST SURABAYA
SHIPPING LANE**

Alvinas Anwar Saputro¹, Zainul Hidayah^{1*}, Harish Wirayuhanto²

¹ Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Pertanian Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Raya Telang No 02 Kamal Bangkalan Madura, Jawa Timur Indonesia

² Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Maritim Raja Ali Haji
Jl. Raya Dompok Dompok Bukit Bestari Kota Tanjung Pinang, Kepulauan Riau Indonesia

*Corresponding author email : zainulhidayah@trunojoyo.ac.id

Submitted: 07 January 2023 / Revised: 29 April 2023 / Accepted: 29 April 2023

<http://doi.org/10.21107/jk.v16i1.18269>

ABSTRAK

Alur Perairan Barat Surabaya (APBS) merupakan salah satu kawasan transportasi laut tersibuk di Indonesia. Perairan ini adalah pintu masuk dan keluar kapal-kapal yang berlabuh atau meninggalkan pelabuhan-pelabuhan yang berada di Surabaya dan Gresik. Lokasi APBS yang berdekatan dengan muara sungai menyebabkan sedimentasi dan pendangkalan yang perlu diatasi. Informasi kecepatan dan arah arus permukaan laut penting sebagai data pendukung perawatan alur. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan deskripsi dinamika arus permukaan laut melalui simulasi pemodelan hidrodinamika dan perbandingan karakteristiknya pada musim dan lokasi yang berbeda. Model hidrodinamika dibangun menggunakan data utama yaitu batimetri dan pasang surut yang divalidasi menggunakan pengukuran data ADCP. Waktu simulasi yang digunakan untuk pemodelan arus yaitu pada bulan Maret 2020 – Februari 2021. Hasil simulasi menjelaskan pola yang berbeda antara musim peralihan 1 dan musim timur dengan musim peralihan 2 dan musim barat. Pada musim peralihan 1 dan musim timur dengan musim peralihan 2 dan musim barat. Kecepatan rata-rata arus permukaan laut pada musim peralihan 1 dan musim timur 0,182 m/s sampai dengan 0,427 m/s dengan arah arus dari selatan dan tenggara menuju utara dan barat laut. Sedangkan pada musim peralihan 2 dan musim barat rata-rata kecepatan arus mencapai 0,183 m/s hingga 0,521 m/s dengan arah dari utara dan barat laut menuju selatan dan tenggara. Validasi model cukup baik dengan RMSE 0,037 dan MAPE 28,7%.

Kata Kunci : model hidrodinamika, arus permukaan laut, simulasi, validasi

ABSTRACT

The Surabaya West Shipping Channel (APBS) is one of Indonesia's busiest sea transportation corridors. These waters serve as the entry and exit points for ships that dock or depart from Surabaya and Gresik ports. The proximity of the APBS to the river mouth causes sedimentation and siltation, which must be addressed. As support data for channel maintenance, information on the speed and direction of sea surface currents is essential. The purpose of this study is to provide a description of the dynamics of sea surface currents using hydrodynamic modeling simulations, as well as a comparison of their characteristics across seasons and locations. The main data, namely bathymetry and tides, were used to build the hydrodynamic model, which was validated using ADCP data measurements. Model simulation was conducted between March 2020 and February 2021. The simulation results explain the differences in patterns between transition season 1 and the east season, as well as transition season 2 and the west season. In the transition season 1 and the east season with the transition season 2 and the west season. The average speed of sea surface currents in the transition season 1 and the east season is 0.182 m/s to 0.427 m/s with the current direction from the south and southeast to the north and northwest. Whereas in the transition season 2 and the west season the average current speed reaches 0.183 m/s to 0.521 m/s in a direction from north and northwest to south and southeast. Model validation is sufficient, with an RMSE of 0.037 and a MAPE of 28.7%.

Key Words : Hydrodynamic model, surface current, simulation, validation

PENDAHULUAN

Kondisi sebuah perairan dipengaruhi oleh beberapa faktor oseanografi diantaranya adalah pasang surut, arus dan gelombang laut. Arus laut merupakan pergerakan massa air secara vertikal maupun horizontal yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti gerakan angin di permukaan laut, fenomena pasang surut serta perbedaan densitas (Permadi *et al.*, 2015; Anisa *et al.*, 2017; Irawan *et al.*, 2018). Sebagai salah satu faktor pembangkit arus, angin mentransferkan energi ke permukaan laut sehingga terjadi arus permukaan laut. Selain itu, pasang surut juga dapat menyebabkan terjadinya arus laut yang dominan terjadi pada kawasan selat, teluk dan estuari (Hiwari & Subiyanto, 2020).

Pola serta karakteristik arus berupa jenis arus dominan, kecepatan, arah, serta pola pergerakan dari arus laut akan membuat kondisi suatu perairan lebih dinamis. Distribusi pergerakan arus penting diketahui sebagai informasi bagi navigasi alur pelayaran (Pratomo *et al.*, 2020). Informasi tentang pola arus juga merupakan data penting bagi perencanaan pembangunan struktur bangunan laut lepas pantai atau pekerjaan fisik yang dilakukan di wilayah pesisir. Untuk mengetahui pola pergerakan arus, maka diperlukan pengamatan dalam waktu yang panjang khususnya untuk musim yang berbeda (Saputra *et al.*, 2017). Hal ini diperlukan karena pergerakan arus di perairan Indonesia secara umum dipengaruhi oleh angin muson dan pasang surut (Tanto *et al.*, 2017, Hidayah *et al.*, 2023).

Data kecepatan dan arah arus permukaan laut dapat diukur menggunakan beberapa instrumen antara lain current meter dan ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Namun, pemanfaatan instrumen-instrumen tersebut lebih banyak digunakan untuk pengukuran sesaat. Sedangkan untuk pengamatan jangka panjang dapat menggunakan *buoy* (pelampung) yang dipasang menetap (*fixed buoy*) atau dihanyutkan (*drifting buoy*) dan dilengkapi GPS serta instrumen pengukur parameter oseanografi lainnya. Namun keberadaan *buoy* ini untuk perairan antar pulau di Indonesia tidak tersedia. Oleh karena itu, pola dinamika arus permukaan laut dapat dipelajari dengan menggunakan pemodelan numerik hidrodinamika (Hapsari *et al.*, 2022; Hidayah *et al.*, 2021; Milasari *et al.*, 2021; Pawitra *et al.*, 2022). Pemodelan hidrodinamika selain digunakan untuk mempelajari arus laut juga banyak diaplikasikan untuk studi tentang pasang surut, banjir rob, pencemaran, distribusi

tumpahan minyak dan perubahan garis pantai (Efendi *et al.*, 2021; Firmansyah *et al.*, 2021; Sagala *et al.*, 2021; Suciaty *et al.*, 2020). Model numerik merupakan metode paling cepat untuk memodelkan dan mengetahui kondisi hidrodinamika laut (Nirwana *et al.*, 2021). Metode ini dapat dilakukan sebagai alternatif yang lebih cepat namun representatif untuk mempelajari pola pergerakan arus permukaan laut, meskipun tetap harus memperhatikan validasi dan error pada model. Melalui pemodelan dan simulasi hidrodinamika menggunakan aplikasi yang tepat, dinamika perubahan arah dan kecepatan arus permukaan laut dapat dianalisis secara spasial dan temporal (Ma'arif & Hidayah, 2020).

Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) merupakan perairan sempit yang menghubungkan Laut Jawa di sebelah utara dan Selat Madura di sebelah selatan. Perairan ini terkenal sebagai pintu masuk kapal-kapal yang akan berlabuh di beberapa pelabuhan di Surabaya atau Gresik, sehingga termasuk salah satu perairan paling padat di Indonesia dengan kapasitas maksimum 27.000 pergerakan kapal setiap tahun. Panjang alur APBS mencapai sekitar 43,6 km dengan sistem rute yang ditetapkan adalah dua arah (*two ways route*) dan lebar alur 150 meter. Kedalaman APBS sekitar -9 meter terhadap *Low Water Spring* (LWS). Setiap tahun, perairan ini memerlukan perawatan pengerukan (*maintenance dredging*) akibat sedimentasi yang terbawa oleh aliran sungai yang bermuara di APBS (Khomsin *et al.*, 2019; Dewi *et al.*, 2022).

Perencanaan perawatan APBS yang rutin dilaksanakan setiap tahun memerlukan tinjauan dari berbagai faktor, terutama kondisi parameter oseanografi khususnya pasang surut dan arus permukaan laut. Selain itu, akibat padatnya lalu lintas kapal, kawasan ini juga rawan terjadi kecelakaan laut yang dapat menimbulkan tumpahan minyak atau bahan pencemar lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan deskripsi dinamika arus permukaan laut melalui simulasi pemodelan hidrodinamika dan perbandingan karakteristiknya pada musim dan lokasi yang berbeda. Hasil analisis penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar simulasi pemodelan lainnya seperti tumpahan minyak, bahan pencemar atau sedimentasi.

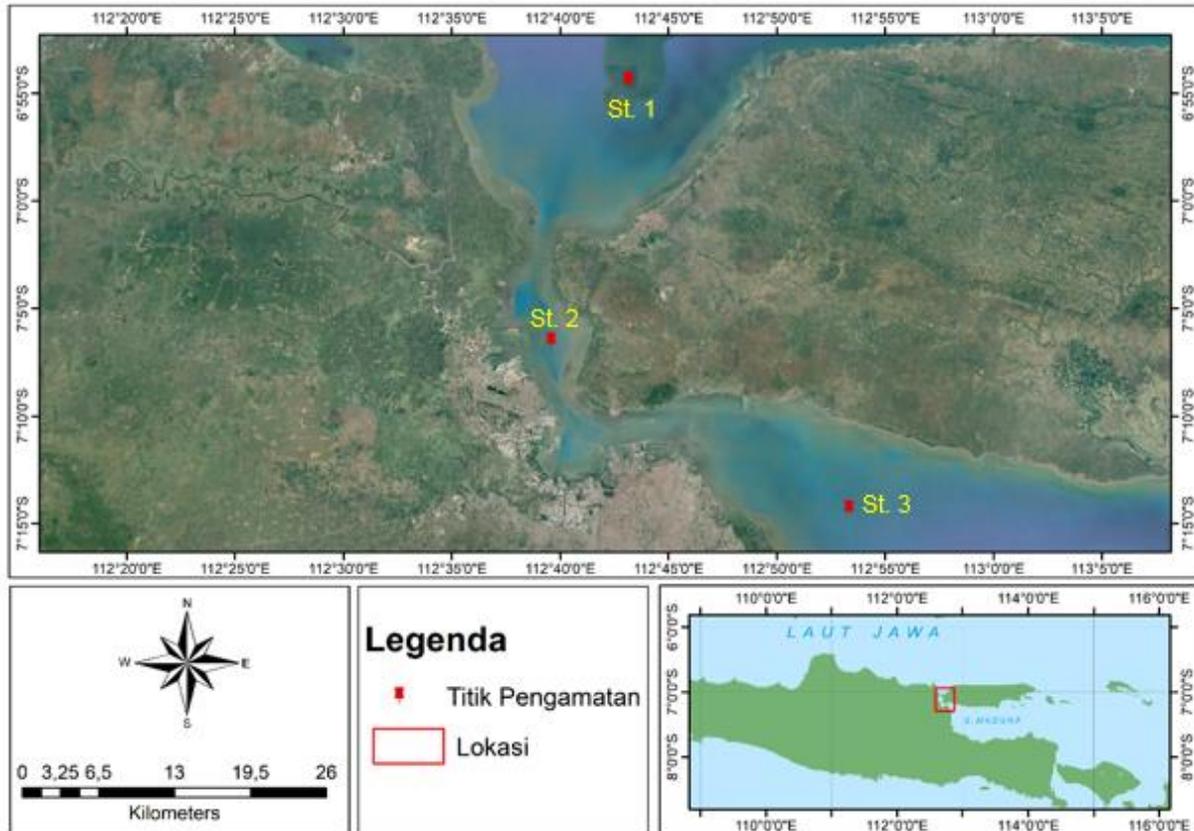
MATERI DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober – Desember 2021. Lokasi studi meliputi

perairan sekitar APBS dengan tiga titik pengamatan yaitu stasiun 1 ($-6^{\circ}.906$ LS dan $112^{\circ}.719$ BT), stasiun 2 (-7.111° LS dan $112^{\circ}.661$ BT) dan stasiun 3 ($-7^{\circ}.240$ LS dan $112^{\circ}.888$ BT). Waktu simulasi yang digunakan untuk pemodelan arus yaitu pada bulan Maret 2020 – Februari 2021. Periode waktu simulasi

dipilih untuk mewakili tiap musim di Indonesia, yaitu musim peralihan 1 (Maret-Mei), musim timur (Juni-Agustus), musim peralihan 2 (September-November) dan musim barat (Desember-Februari). Lokasi penelitian terdapat pada **Gambar 1** berikut ini :



Gambar 1. Lokasi Pemodelan dan Titik Pengamatan Data Hasil Simulasi (Sumber Peta : Google Earth & RBI)

Data Pemodelan

Data dasar yang digunakan dalam membuat pemodelan arus terdiri dari data batimetri dan pasang surut. Data batimetri kawasan perairan APBS diperoleh dengan melakukan digitasi pada peta batimetri yang berasal dari Pusat Hidro Oseanografi (PUSHIDROS) TNI Angkatan Laut. Sementara itu untuk data pasang surut per jam diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Maritim Tanjung Perak Surabaya. Selanjutnya digunakan pula data hasil pengukuran ADCP yang dilakukan pada tanggal 6-9 Agustus 2021 sebagai validasi dari hasil pemodelan.

Tahapan Pemodelan dan Simulasi

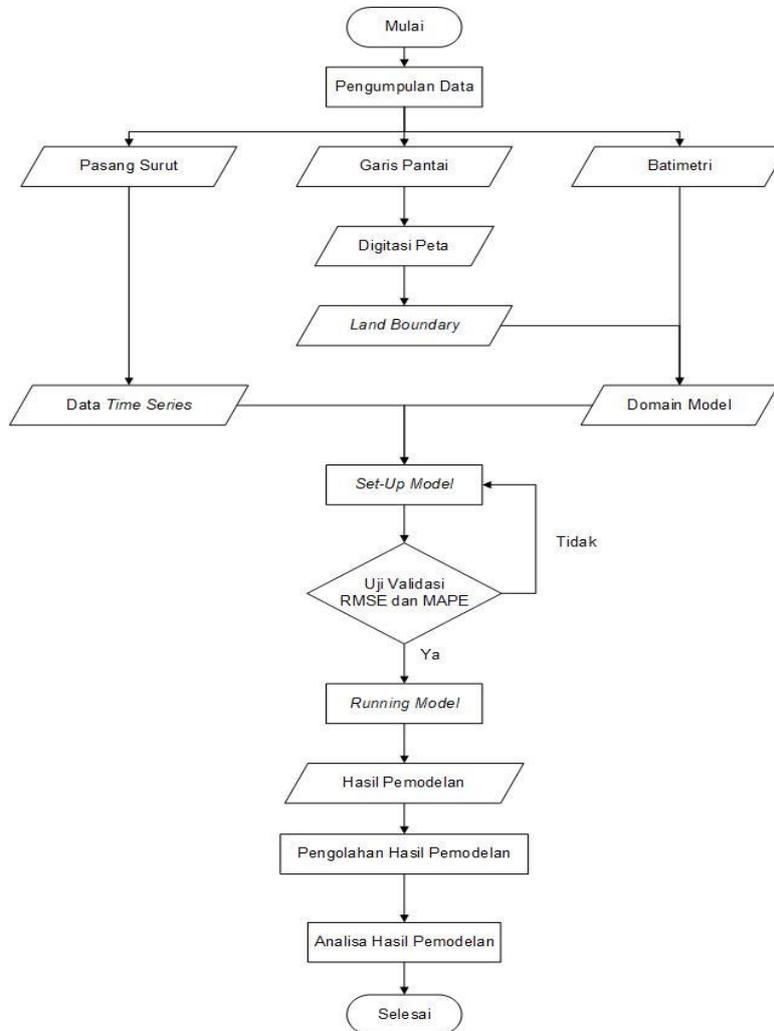
Alur pemodelan hidrodinamika arus permukaan laut di wilayah APBS terdiri dari *pre-processing* yang meliputi pembuatan domain dari peta batimetri, *processing* yang meliputi pengaturan parameter (*set-up model*) dan *running model*

yang meliputi visualisasi model simulasi hingga analisis hasil model. Perangkat lunak pemodelan yang digunakan pada penelitian ini adalah DHI Mike 21 HD Module. Alur pemodelan hidrodinamika terdapat pada **Gambar 2** dibawah ini.

Peta batimetri digunakan sebagai bahan pembuatan domain model (*mesh*). Data tersebut dilakukan proses penyesuaian koordinat (*rectifying*) menggunakan *software* Global Mapper. Proses selanjutnya yaitu digitasi peta untuk mengambil data kedalaman perairan menggunakan *software* Surfer. Format data yang digunakan harus dalam bentuk (.text). Pembuatan domain model juga memerlukan data garis pantai untuk membatasi area pemodelan pada sisi daratan (*land boundary*). Data batimetri dan data *boundary* diolah dengan menggunakan *meshing triangulate* pada Modul *Mesh Generator* Mike 21 untuk membuat domain model dengan format (.mesh).

Waktu simulasi dan *time step* yang digunakan dalam simulasi sesuai dengan inputan model yaitu data pasang surut yang diatur pada setiap musim sehingga terdapat empat kali pemodelan arus dengan jumlah *time step* yang berbeda-beda. Penelitian ini menggunakan tiga *boundary condition* yaitu *land zero* atau garis pantai yang berarti batas antara daratan dan lautan. *Boundary* kedua dan ketiga berupa

batas yang terhubung dengan laut yang digunakan untuk memasukkan data pasang surut. Hasil dari simulasi berupa kecepatan dan arah arus permukaan secara 2 dimensi. Pengaturan waktu simulasi model berdasarkan musim dapat dilihat pada **Tabel 1** sedangkan parameter *Set-Up* model dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Pemodelan Arus Permukaan Laut APBS

Tabel 1. Pengaturan Waktu Simulasi

Musim	Waktu	Interval
Peralihan I	1 Maret - 31 Mei 2020	3600 detik
Muson Timur	1 Juni – 31 Agustus 2020	3600 detik
Peralihan II	1 September – 30 November 2020	3600 detik
Muson Barat	1 Desember 2020 - 29 Februari 2021	3600 detik

Tabel 2. Parameter *Set Up* Model pada DHI Mike 21 HD Module

No	Parameter	Pengaturan
1	Solution Technique	<i>Time integration : Low order,fast algorithm</i> <i>Space discretization : Low order,fast algorithm</i>
2	Depth	<i>No depth correction</i>
3	Flood and Dry	<i>Standard</i>
4	Density	<i>Barotropic</i>

No	Parameter	Pengaturan
5	Eddy Viscosity	Type: Smagorinsky formulation Format : Constant
6	Bed Resistance	Type : Manning number Format : Constant
7	Coriolis Forcing	Varying in domain
8	Wind Forcing	No wind forcing
9	Ice Coverage	No ice coverage
10	Tidal Potential	No tidal potential
11	Precipitation- Evaporation	No precipitation No evaporation
12	Wave Radiation	No wave radiation
13	Source	No source
14	Structures	No structures
15	Initial Condition	Constant
16	Boundary Conditions	Type : Specified level Format : varying in time, constant along boundary Data file and item : pasang surut (.dfs0)
17	Decoupling	No decoupling
18	Outputs	Output Specification a) Field type : 2D b) Output format : Area Series Outputs Item a) Basic variabel : surface elevation, U velocity, V velocity b) Additional variabel : Current speed, Current direction

Persamaan matematika yang digunakan untuk simulasi pemodelan arus mengikuti formula 1-3.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

Momentum pada sumbu X dan Y dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan= $h(x, y, t)$: kedalaman air (m); $V_x, V_y(x, y, t)$: komponen angin (m/s); $d(x, y, t)$: variasi kedalaman perairan per waktu (m); $\Omega(x, y)$: parameter coriolis (s^{-1}); $\zeta(x, y, t)$: ketinggian muka air (m); $p_a(x, y, t)$: tekanan atmosfer (kg/m^2); p, q : XY densitas flux ($m^3/s/m$); ρ_w : densitas air (kg/m^3); $C(x, y)$: chezy barrier ($m^{1/2} \cdot s$); x, y : koordinat; g : gaya gravitasi (m/s^2); t : waktu (s); $f(V)$: faktor gesekan angin; T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} : komponen tegangan geser

Validasi Model

Validasi atau keakuratan model arus permukaan laut yang dibuat diukur dengan

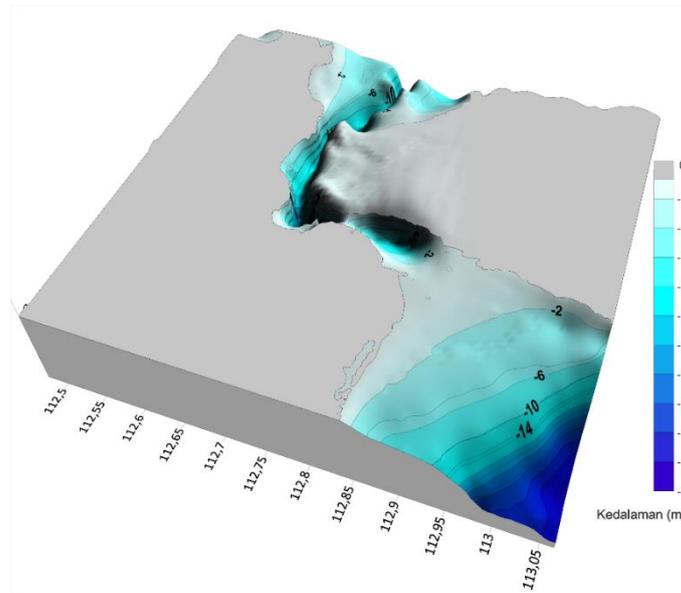
melakukan perbandingan arah dan kecepatan arus antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran arus secara langsung menggunakan alat ADCP. Akurasi model ditentukan dengan menghitung nilai RMSE (Root Mean Square Error) dan MAPE (Mean Absolute Percentage Error) dengan persamaan dibawah ini.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Aktual-Model)^2}{n}} \dots\dots\dots (4)$$

$$MAPE = \frac{\sum(Model-Aktual)}{n} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN
Batimetri

Berdasarkan hasil interpolasi data batimetri, dapat dilihat bahwa lokasi penelitian yang berada di Alur Pelayaran Barat Surabaya merupakan perairan yang memiliki kedalaman berkisar 5-30 meter. Bagian utara APBS yang berbatasan dengan perairan Laut Jawa memiliki kedalaman sekitar 7-10 meter, sedangkan di posisi tengah APBS memiliki kedalaman sekitar 10-15 meter. Selanjutnya bagian APBS yang terhubung dengan perairan Selat Madura tercatat memiliki kedalaman sekitar 6-30 meter. Profil kedalaman APBS disajikan pada **Gambar 3**.

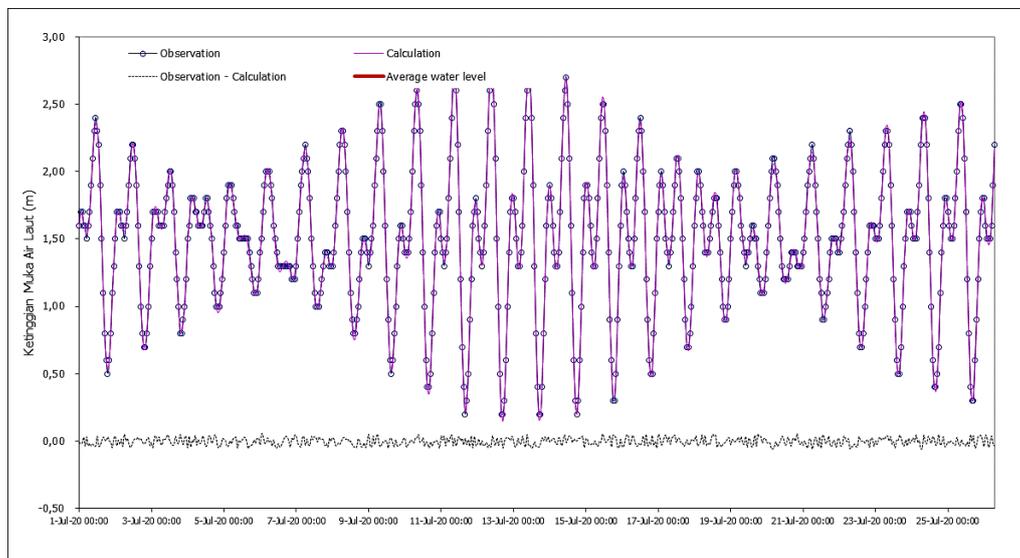


Gambar 3. Profil 3D Batimetri Perairan APBS

Pasang Surut

Analisis pasang surut pada penelitian ini menggunakan data ketinggian muka air laut per jam dari bulan Maret 2020 hingga Februari 2021. Data tersebut kemudian dikelompokkan

berdasarkan musim yang kemudian diolah dengan menggunakan metode *Least Square* untuk menentukan tipe pasut dan beberapa parameter ketinggian muka air laut lainnya. Grafik pasut yang diwakili oleh hasil analisis pada musim timur disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola Pasang Surut Perairan APBS

Tabel 3. Parameter Pasang Surut Perairan APBS (meter)

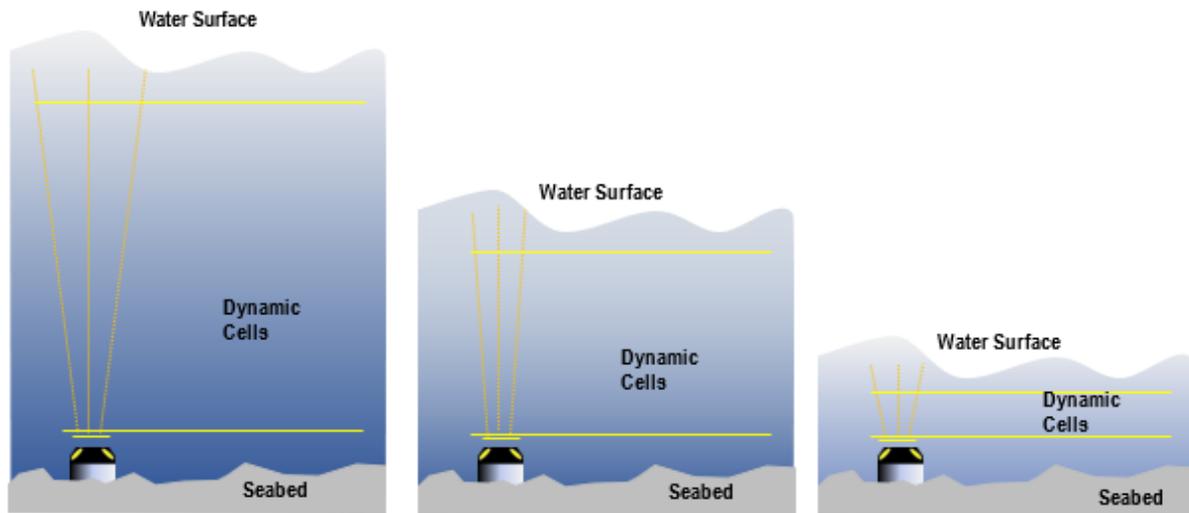
Parameter	Peralihan 1	Muson Timur	Peralihan 2	Muson Barat
Higher High Water Level (HHWL)	3,10	3,06	3,06	3,07
Mean High Water Level (MHWL)	2,65	2,60	2,65	2,64
Mean Sea Level (MSL)	1,50	1,50	1,50	1,50
Mean Low Water Level (MLWL)	0,47	0,45	0,45	0,46
Lower Low Water level (LLWL)	0,12	0,10	0,10	0,10

Tabel 3 menunjukkan nilai beberapa parameter ketinggian muka air berdasarkan data pasang surut di perairan APBS. Nilai tinggi muka air tertinggi saat pasang (HHWL) untuk seluruh musim berkisar antara 3,06 - 3,10 meter, sedangkan tinggi muka air terendah saat surut mencapai 0,10 – 0,12 meter. Sementara itu nilai muka air laut rerata (MSL) untuk seluruh musim menunjukkan hasil yang sama yaitu 1,50 meter. Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui bahwa tipe pasut di perairan APBS adalah campuran condong ke harian ganda (*Mixed Tide Prevailing Semidiurnal*) dengan nilai *Formzahl* berkisar antara 0,93 - 1,385 ($0,25 < F < 1,5$). Sebagai perairan sempit yang menghubungkan perairan Laut Jawa pesisir utara Jawa Timur dan Selat Madura, kondisi pasang surut di APBS dipengaruhi oleh perairan di sekitarnya. Tipe pasang surut perairan APBS yang diperoleh pada penelitian ini mengkonfirmasi hasil penelitian sebelumnya di perairan Selat Madura yang menunjukkan tipe pasang surut yang sama (Fajar et al., 2014; Prayogo, 2021). Namun, tipe pasang surut ini berbeda dengan perairan Laut Jawa yang cenderung termasuk dalam tipe campuran condong ke harian tunggal (*Mixed Tide Prevailing Diurnal*). Perbedaan tersebut terjadi karena kondisi pasang surut di perairan Laut

Jawa merupakan hasil interaksi antara massa air laut yang datang dari Samudera Pasifik dan Hindia yang kemudian masuk ke Laut Jawa dari arah timur, serta massa air laut yang datang dari Laut Cina Selatan yang masuk ke Laut Jawa dari arah barat melalui Selat Karimata (Budi & Pamungkas, 2017; Wei et al., 2016).

Pengukuran Arus Menggunakan ADCP dan Uji Validasi Model

Pengukuran arus permukaan laut menggunakan ADCP di perairan APBS dilakukan selama 3 hari yang dimulai tanggal 6 Agustus 2021 pukul 22.00 WIB hingga 9 Agustus 2021 pukul 17.00 WIB dengan interval waktu 10 menit. Alat ADCP pada penelitian ini dipasang pada kedalaman 7 meter dengan pembacaan data setiap 1 meter. Lokasi penempatan ADCP adalah di stasiun 2. Pada prinsipnya, ADCP bekerja dengan mentransmisikan gelombang suara ke kolom air dengan pola tertentu dan kemudian diterima kembali pantulannya yang disebabkan karena partikel-partikel yang ada di dalam kolom air. Informasi tersebut dianalisa berdasarkan pergeseran frekuensi menurut teori Doppler. Ilustrasi pemasangan dan cara kerja ADCP ditampilkan pada **Gambar 5**.



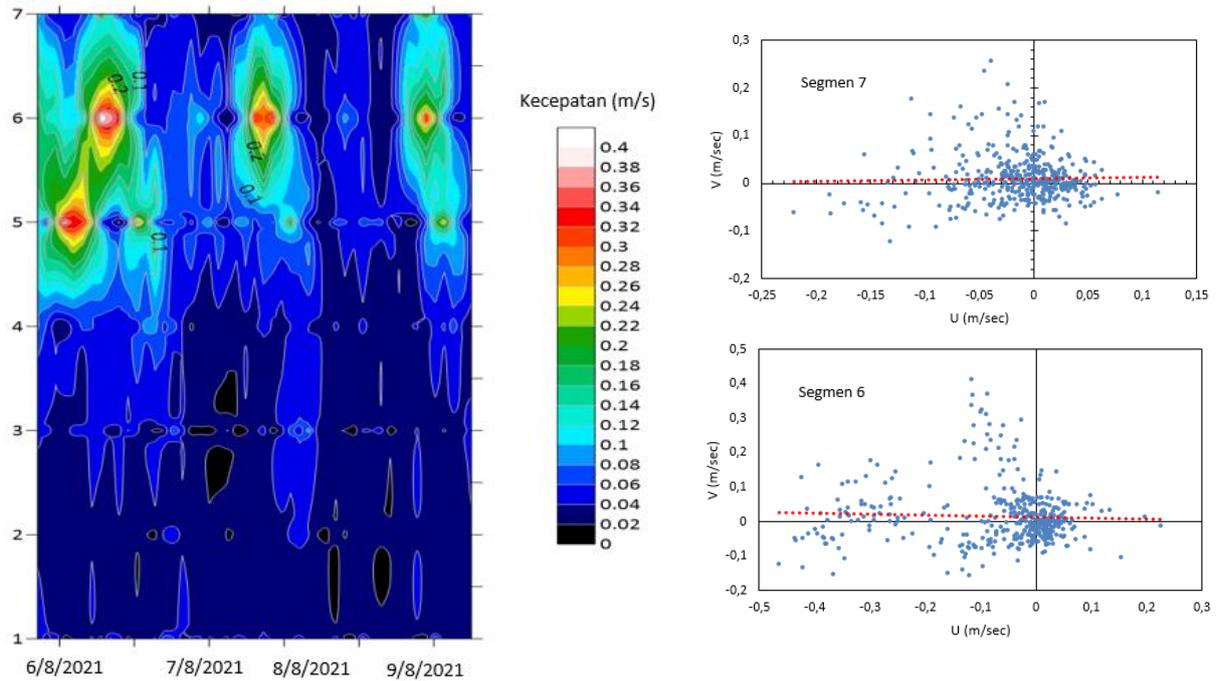
Gambar 5. Pemasangan ADCP untuk Pengukuran Arus Permukaan Laut (Sumber : Armono et al., 2021)

Hasil yang didapatkan pada pengukuran arus menggunakan ADCP di perairan APBS mendapatkan nilai kecepatan arus paling tinggi yaitu 0,181 m/s, dan kecepatan paling rendahnya sebesar 0.016. Nilai tersebut didapatkan dari data ADCP segmen ke 6 dan 7 yang merupakan layer yang terletak di dipermukaan air. Kecepatan arus yang dihasilkan oleh ADCP ditampilkan dengan keterangan kontur pada masing- masing

lapisan (**Gambar 6a**). Hasil pengukuran arus pada lapisan 1 hingga lapisan 4 didominasi oleh arus yang berkecepatan 0,01 m/s hingga 0,08 m/s. Kecepatan arus yang lebih besar berada pada lapisan 5 dan 6, dengan kisaran kecepatan arus 0.12 m/s hingga 0.2 m/s. Selanjutnya arah pergerakan arus dapat dilihat berdasarkan diagram pencar komponen U (arah barat-timur) dan komponen V (arah utara-selatan). Berdasarkan hasil analisa dapat

diketahui bahwa arus permukaan laut APBS saat pengukuran menggunakan ADCP dominan bergerak dari timur menuju barat dan

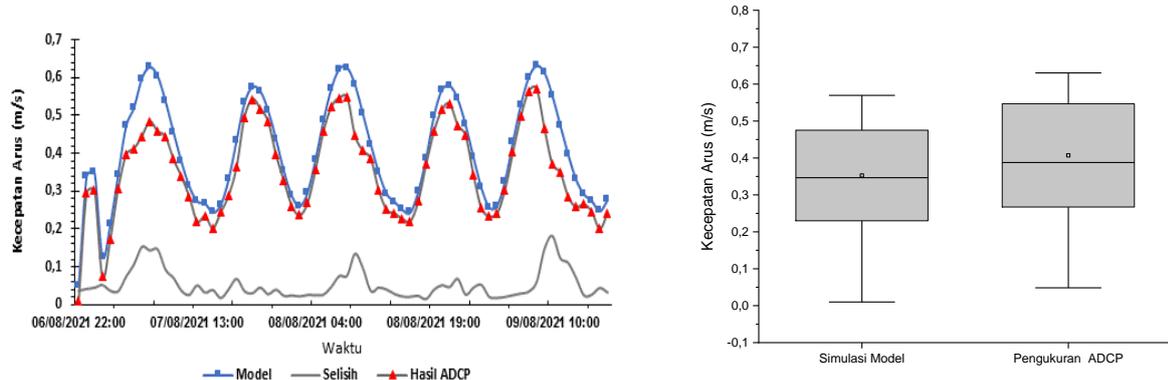
terlihat pula pergerakan arus dari arah utara menuju selatan (**Gambar 6b**).



Gambar 6. (a) Penampang Vertikal Hasil Pengukuran Arus Permukaan Laut Menggunakan ADCP; (b) Diagram Pencar Arah Arus Permukaan Laut

Selanjutnya hasil pengukuran ADCP digunakan untuk melakukan validasi model arus yang dibuat menggunakan modul HD pada Mike 21. Validasi model digunakan untuk mengetahui keakuratan hasil yang diperoleh dari pemodelan dengan hasil pengamatan secara

langsung di lapangan. Model disimulasikan sesuai dengan periode waktu pengukuran arus menggunakan ADCP. Selanjutnya kecepatan arus hasil simulasi model dibandingkan dengan kecepatan arus hasil pengukuran ADCP (**Gambar 7**).



Gambar 7. Perbandingan Kecepatan Arus Hasil Simulasi Model dan Pengukuran ADCP

Perbedaan kecepatan arus di perairan APBS antara hasil simulasi dengan data ADCP relatif konstan dengan kisaran nilai perbedaan yang dominan sebesar 0.03 m/s. Kecepatan tertinggi dari hasil modeling sebesar 0.63 m/s dan kecepatan arus terendahnya sebesar 0.04 m/s. Hasil kecepatan arus yang dihasilkan untuk data ADCP memiliki kecepatan tertinggi yaitu 0.51 m/s, sedangkan untuk kecepatan arus terendah adalah 0.01 m/s. Hasil uji akurasi

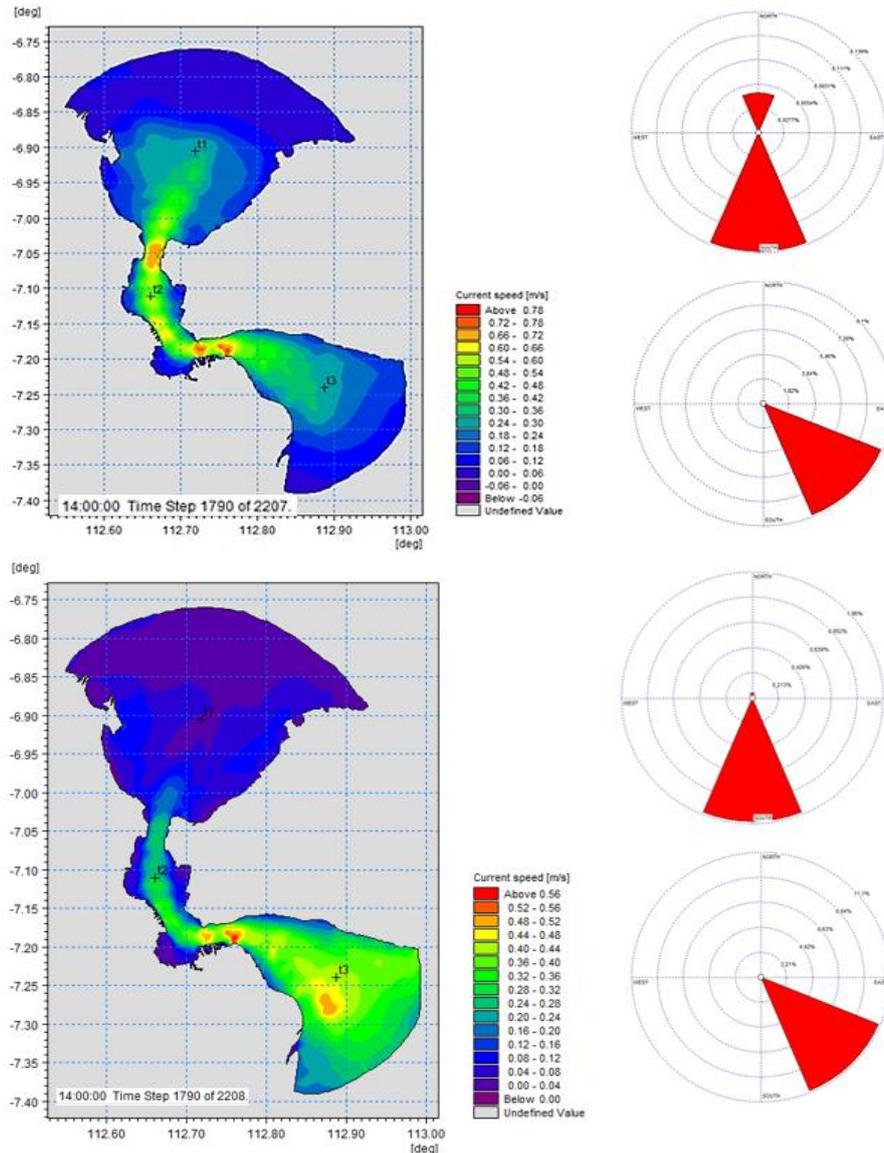
menggunakan RMSE mendapatkan nilai sebesar 0,037 dan MAPE 28,7%. Perhitungan akurasi berdasarkan nilai RMSE menunjukkan perbedaan antara hasil simulasi dan pengukuran ADCP relatif kecil. Hal ini juga didukung oleh hasil perhitungan MAPE yang berada pada kisaran 20-50% dan termasuk kategori wajar (Hidayah *et al.*, 2021). Hasil uji validasi menggunakan nilai RMSE dan MAPE menunjukkan bahwa model arus permukaan

laut yang dibuat cukup representatif untuk menggambarkan kondisi sebenarnya.

Hasil Simulasi Berdasarkan Musim Musim Peralihan I dan Musim Timur

Musim peralihan 1 di perairan Indonesia berlangsung dari bulan Maret hingga Mei yang menandakan pergantian dari musim hujan menuju musim kemarau. Pada bulan-bulan ini

curah hujan mulai berkurang dan angin bertiup dari arah tenggara dan selatan. Hasil simulasi model di perairan APBS menunjukkan bahwa kecepatan arus rata-rata pada stasiun 1 sampai dengan 3 berturut turut yaitu 0,218 m/s, 0,427 m/s dan 0,261 m/s. Kecepatan arus maksimum berkisar antara 0,463 m/s hingga 0,634 m/s. Arah arus menunjukkan pergerakan massa air dari selatan dan tenggara menuju utara dan barat laut (**Gambar 8a**).



Gambar 8. Simulasi Model Arus Permukaan Laut APBS (a) Musim Peralihan 1 dan (b) Musim Timur

Sementara itu, pada saat musim timur yang berlangsung dari bulan Juni sampai dengan Agustus bertepatan dengan terjadinya musim kemarau di Indonesia. Kecepatan rata-rata arus permukaan laut di stasiun 1 adalah 0,182 m/s. Sedangkan di stasiun 2 dan 3 memiliki kecepatan arus rata-rata yang lebih tinggi yaitu 0,423 m/s dan 0,286 m/s. Sementara itu untuk kecepatan arus maksimum seluruh stasiun berkisar antara 0,489 sampai dengan 0,624

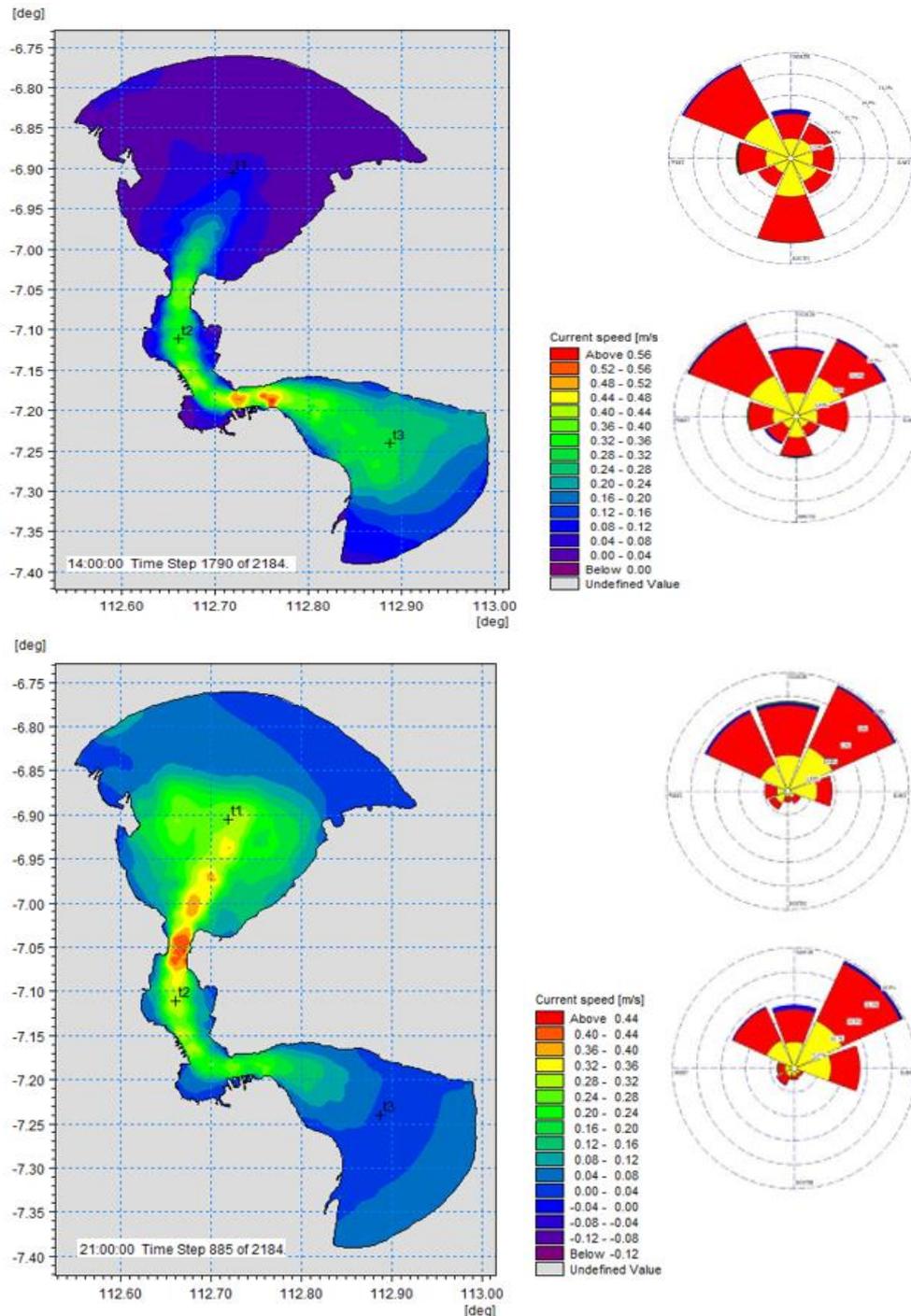
m/s. Arah arus bergerak dari selatan dan tenggara dari Selat Madura menuju utara atau keluar ke laut Jawa.

Musim Peralihan 2 dan Musim Barat

Simulasi model arus permukaan laut kemudian dilanjutkan untuk musim peralihan 2 yang merupakan periode pergantian musim kemarau ke musim hujan. Musim peralihan 2 merupakan

peralihan antara muson timur menuju muson barat yang terjadi di bulan September sampai dengan November. Kecepatan rata-rata arus permukaan laut di stasiun 1 adalah 0,183 m/s. Sedangkan di stasiun 2 dan 3 memiliki

kecepatan arus rata-rata yang lebih tinggi yaitu 0,521 m/s dan 0,261 m/s. Sementara itu untuk kecepatan arus maksimum seluruh stasiun berkisar antara 0,458 sampai dengan 0,641 m/s.



Gambar 9. Simulasi Model Arus Permukaan Laut APBS (a) Musim Peralihan 2 dan (b) Musim Barat

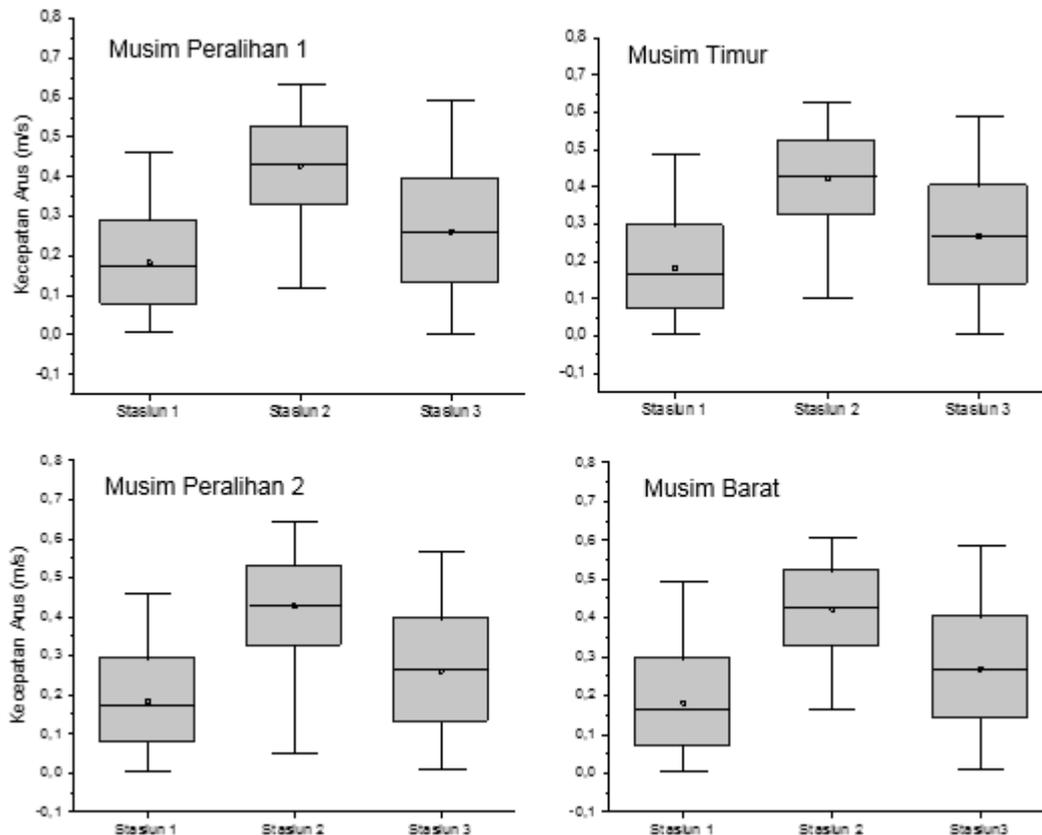
Sedangkan pada simulasi musim barat diperoleh hasil kecepatan rata-rata arus permukaan laut berkisar antara 0,182 m/s hingga 0,433 m/s. Sedangkan kecepatan arus maksimum relatif sama dengan musim peralihan 2 yaitu sekitar 0,492 m/s sampai dengan 0,605 m/s. Kecepatan arus di stasiun 2

lebih tinggi dibandingkan stasiun lainnya. Arah pergerakan arus dari arah utara dan barat laut menuju selatan dan tenggara. Apabila ditinjau dari pergerakannya maka pada musim peralihan 2 dan musim barat massa air bergerak dari perairan Laut Jawa masuk ke perairan Selat Madura (**Gambar 9b**).

Perbandingan Kecepatan Arus Permukaan Laut

Simulasi kecepatan arus permukaan laut perairan APBS dengan pengamatan di 3 titik lokasi menunjukkan hasil yang konsisten berbeda pada seluruh musim (**Gambar 10**). Titik stasiun 2 yang terletak di tengah APBS memiliki rata-rata kecepatan arus tertinggi dibandingkan stasiun lainnya. Rata-rata kecepatan arus di stasiun 2 sekitar 0,453 m/s

sampai dengan 0,641 m/s. Sementara stasiun 1 yang mewakili titik di perairan Laut Jawa memiliki kecepatan arus rata-rata 0,183 m/s – 0,218 m/s. Sedangkan di stasiun 3 yang mewakili titik perairan Selat Madura tercatat kecepatan arus rata-rata mencapai 0,260 m/s - 0,281 m/s. Hasil uji statistik menegaskan adanya perbedaan rata-rata kecepatan yang signifikan diantara ketiga lokasi ini (*One Way Anova*, p value < 0,05, SK 95%).



Gambar 10. Diagram Box Plot Perbandingan Hasil Simulasi Kecepatan Arus antar Stasiun

Perbedaan kecepatan arus hasil dari simulasi ini disebabkan oleh bentuk perairan APBS yang menyempit di bagian tengah. Kondisi ini berpengaruh terhadap massa air, dimana arus yang melewati lokasi sempit akan mengalir lebih cepat dibandingkan perairan yang lebih luas. Fenomena kecepatan arus yang lebih tinggi saat melewati selat sempit dapat juga diamati di perairan Selat Bali dan Selat Lembeh Sulawesi Utara (Hiwari & Subiyanto, 2020; Setiawan *et al.*, 2021).

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat menggambarkan pola musiman pergerakan arus yang terjadi di perairan APBS. Informasi pola arah dan kecepatan arus sangat berguna sebagai data navigasi kapal laut dan perencanaan bangunan di pesisir atau lepas pantai, contohnya antara lain adalah

pembangunan darmaga/ jetty, platform pengeboran minyak lepas pantai (rig) dan konstruksi bangunan pantai lainnya. Selain itu, hasil yang diperoleh dari simulasi arus laut dapat digunakan untuk mendeteksi dampak dari terjadinya kecelakaan yang menimbulkan tumpahan minyak di laut. Melalui informasi pola arah dan kecepatan arus dapat diprediksi penyebaran tumpahan minyak termasuk luas dan waktu untuk mencapai lokasi tertentu, sehingga dapat dilakukan upaya-upaya mitigasi yang diperlukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Simulasi arah dan kecepatan arus permukaan laut di perairan APBS menjelaskan pola yang berbeda antara musim peralihan 1 dan musim timur dengan musim peralihan 2 dan musim

barat. Kecepatan rata-rata arus permukaan laut pada musim peralihan 1 dan musim timur 0,182 m/s sampai dengan 0,427 m/s dengan arah arus dari selatan dan tenggara menuju utara dan barat laut. Sedangkan pada musim peralihan 2 dan musim barat rata-rata kecepatan arus mencapai 0,183 m/s hingga 0,521 m/s dengan arah dari utara dan barat laut menuju selatan dan tenggara. Kecepatan arus permukaan laut tertinggi terjadi di stasiun 2 yang terletak di bagian sempit APBS dengan rata-rata kecepatan mencapai 0,453 m/s sampai dengan 0,641 m/s. Hasil validasi pemodelan menunjukkan bahwa model yang dibangun cukup merepresentasikan kondisi sebenarnya dengan RMSE model 0,037 dan MAPE model 28,7%.

DAFTAR PUSTAKA

- Anisa, M.N., Purwanto., Indra Budi P. (2017). Studi Pola Arus Laut Di Perairan Tapaktuan, Aceh Selatan. *Jurnal Oseanografi*, 6(1), 183-192
- Armono, H. D., Sujantoko, Hidayah, Z., & Nuzula, N. I. (2021). Hydro-oceanographic mapping to support coastal eco-tourism activities in Bawean Island, East Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 649(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/649/1/012036>
- Budi, W., & Pamungkas, A. (2017). Perbandingan Karakteristik Oseanografi Pesisir Utara Dan. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan Dan Perikanan, September*, 191–202.
- Dewi, A. E. P., Hidayah, Z., Farid, A., & Wiyanto, D. B. (2022). Karakteristik dan Distribusi Spasial Bahan Organik Pada Sedimen Dasar Perairan Teluk Pacitan Jawa Timur. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(2), 267-278.
- Efendi, U., Kristianto, A., & Pratama, B. E. (2021). Respon Hujan Lebat dan Kenaikan Tinggi Muka Laut terhadap Prediksi Luasan Banjir Rob Kota Semarang. *Jurnal Kelautan Nasional*, 16(3), 157–167.
- Fajar, Purwanto, & Indriyanti, E. (2014). *Kajian Potensi Arus Laut Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Perairan Sekitar Jembatan Suramadu Selat Madura*. 3(3), 294–303. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Firmansyah, M. D., Ismanto, A., Wulandari, S. Y., Widiaratih, R., Rifai, A., & Atmodjo, W. (2021). Pemodelan Sebaran Tumpahan Minyak di Perairan Karawang, Jawa Barat. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(2), 200–212. <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i2.31736>
- Hapsari, L. P., Djari, A. A., & Ghifara, A. (2022). Pemodelan Hidrodinamika Pola Arus dan Pasang Surut di Perairan Pulau Tidung. *Maspari*, 14(2), 79–89.
- Hidayah, Z., Wirayuhanto, H., Norma Sari, Z. R., & Wardhani, M. K. (2021). Modelling sea surface currents in the eastern coast of Bawean Island, East Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012006>
- Hidayah, Z., Maula, M., & Wardhani, M. K. (2023). Pemodelan Arus dan Muatan Padatan Tersuspensi di Perairan Estuari Muara Bengawan Solo Ujung Pangkah Gresik. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 87-97.
- Hiwari, H., & Subiyanto. (2020). Pemodelan Arus Permukaan Laut Selat Iembah Sulawesi Utara Menggunakan Aplikasi Mike 21. *Jurnal Akuatek*, 1(2), 84–93.
- Irawan, S., Fahmi, R., & Roziqin, A. (2018). Kondisi Hidro-Oseanografi (Pasang Surut, Arus Laut, Dan Gelombang) Perairan Nongsa Batam. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.21107/jk.v11i1.4496>
- Khomsin, Yusuf, I. M., & Handoko, E. Y. (2019). Analisis Volume Pengerukan Alur Pelayaran Barat Surabaya dengan Data Multibeam Echosounder Menggunakan Perangkat Lunak Hypack dan Auto CAD Civil 3D. *Geoid*, 14(2), 111–116.
- Ma'arif, N. L., & Hidayah, Z. (2020). Kajian Pola Arus Permukaan Dan Sebaran Konsentrasi Total Suspended Solid (Tss) Di Pesisir Pantai Kenjeran Surabaya. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 1(3), 417-426.
- Milasari, A., Ismunarti, D. H., Indrayanti, E., & Muldiyatno, F. (2021). Model Arus Permukaan Teluk Lampung pada Musim Peralihan II dengan Pendekatan Hidrodinamika. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3), 259–268. <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i3.38293>
- Nirwana, N., Subiyanto, Nurul Ihsan, Y., & Yuniarti. (2021). Sediment Transport Pattern Modelling in Bojong Salawe Coast Pangandaran using Mike 21. *International Journal of Quantitative Research and Modeling*, 2(2), 97–116. <https://journal.rescollacom.com/index.php/ijqrm/index>

- Pawitra, M. D., Indrayanti, E., Yusuf, M., & Zainuri, M. (2022). Sebaran Sedimen Dasar Perairan dan Pola Arus Laut Di Muara Sungai Loji, Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(3), 22–32. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i3.13443>
- Permadi, L., Indrayanti, E., & Rochaddi, B. (2015). Studi Arus Pada Perairan Laut Di Sekitar Pitu Sumuradem Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Oseanografi*, 4(2), 116387.
- Pratomo, D. G., Rinaldi, M., & Aziz, F. (2020). Optimasi Penggunaan Sediment Trap pada Alur Pelayaran Barat Surabaya Menggunakan Pemodelan Transpor Sedimen. *Geoid*, 15(2), 228–239.
- Prayogo, L. M. (2021). Analisis Kenaikan Muka Air Laut Di Perairan Kalianget Kabupaten Sumenep Tahun 2000-2020. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 2(1), 61–68. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v2i1.10035>
- Sagala, H. A., Pasaribu, R. P., & Ulya, F. K. (2021). Pemodelan Pasang Surut dengan Menggunakan Metode Flexible Mesh untuk Mengetahui Genangan Rob di Pesisir Karawang. *Pelagicus*, 2(3), 141. <https://doi.org/10.15578/plgc.v2i3.10341>
- Saputra, V. H., Rifai, A., & Kunarso. (2017). Variabilitas Musiman Pola Arus di Perairan Surabaya Jawa Timur. *Journal of Oceanography*, 6(1), 439–448. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/20203>
- Setiawan, F., Prasita, V. D., & Widagdo, S. (2021). Pergerakan Arus Permukaan Laut Selat Bali Berdasarkan Parameter Angin Dan Cuaca. *Jurnal Riset Kelautan Tropis*, 1(2), 25. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v1i2.25>
- Suciaty, F., Kemili, P., & Harkey, T. (2020). Studi Distribusi Partikel Sedimen Tersuspensi Di Teluk Balikpapan Dengan Menggunakan Pemodelan Dispersal. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 3(3), 193–204. <https://doi.org/10.26760/jrh.v3i3.3430>
- Tanto, T. Al, Wisha, U. J., Kusumah, G., Pranowo, W. S., & Husrin, S. (2017). Karakteristik Arus Laut Perairan Teluk Benoa-Bali. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 23(1), 37–48.
- Wei, Z., Fang, G., Susanto, R.D., Adi, T.R., Fan, B., Setiawan, A., Li, S., Wang, Y. & Gao, X. (2016). Tidal elevation, current, and energy flux in the area between the South China Sea and Java Sea. *Ocean Science*, 12, 517-531. DOI: 10.5194/os-12-517-2016