

Pola Arus Permukaan di Alur Pelayaran Barat Surabaya Berdasarkan Model Numerik Hidrodinamika

Rhiznandya Pradipta Santoso¹, Engki A Kisnarti^{1,2}

¹Program Studi Oseanografi, Faklutas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah

²Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Korespondensi, engki.andri@hangtuah.ac.id

Diterima: 6 November 2025; Direvisi: 2 April 2026; Disetujui: 30 April 2026

Abstrak

Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) merupakan jalur utama menuju Pelabuhan Tanjung Perak yang memiliki intensitas lalu lintas kapal tinggi dan kondisi hidrodinamika kompleks. Penelitian ini bertujuan menganalisis pola arus permukaan berdasarkan model numerik hidrodinamika guna memperoleh pemahaman mendalam mengenai karakteristik arah, kecepatan, dan distribusi arus permukaan yang dipengaruhi dinamika pasang surut. *Input* model numerik hidrodinamika adalah data batimetri, pasang surut, dan angin. Selanjutnya, model disimulasikan selama satu tahun dengan *output* arus permukaan (dua dimensi). Dalam pelaksanaannya, penelitian ini dilandasi nilai profesionalisme dan etika keinsinyuran dengan menjunjung tinggi integritas ilmiah, akurasi data, serta tanggung jawab sosial terhadap keselamatan pelayaran dan keberlanjutan lingkungan laut. Selain itu, setiap tahap kegiatan penelitian dilakukan dengan memperhatikan prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L) untuk menjamin keamanan personel, perlindungan alat, dan pencegahan dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Hasil simulasi menunjukkan APBS memiliki kedalaman 5-30 m dengan *slope* yang sangat landai (0,001). Tipe pasang surut campuran cenderung harian ganda memberi pengaruh dominan dalam arah arus (utara-timur) dengan kecepatan 0,75 m/s saat air laut dalam kondisi pasang dan 0,25 m/s saat laut dalam kondisi surut. Area tengah dan selatan APBS memiliki indeks risiko keselamatan pelayaran sedang hingga tinggi. Secara keseluruhan, hasil menegaskan arus permukaan dan kondisi morfologi dasar laut berperan penting terhadap stabilitas dan manuver kapal, sehingga perlu menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan, pengaturan, dan pengelolaan alur pelayaran. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan informasi ilmiah tentang pola arus permukaan di APBS, tetapi juga menjadi contoh penerapan profesionalisme, etika, dan budaya K3L dalam praktik keinsinyuran kelautan.

Kata kunci: profesionalisme, etika, budaya K3L

Abstract

Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) is the main route to Tanjung Perak Port, which has high ship traffic intensity and complex hydrodynamic conditions. This study aims to analyze surface current patterns based on a hydrodynamic numerical model to gain a deep understanding of the characteristics of the direction, speed, and distribution of surface currents influenced by tidal dynamics. The input of the hydrodynamic numerical model is bathymetry, tidal, and wind data. Next, the model is simulated for one year with surface current output (two dimensions). In its implementation, this research is based on the values of professionalism and engineering ethics by upholding scientific integrity, data accuracy, and social responsibility for shipping safety and marine environmental sustainability. In addition, each stage of the research activity is carried out with due regard to the principles of Occupational Safety and Health and Environmental Protection to ensure personnel safety, equipment protection, and the prevention of negative impacts on aquatic ecosystems. The simulation results show that the APBS has a depth of 5-30 m with a very gentle slope (0.001). The mixed tidal type tends to be double daily, with a dominant influence on

current direction (north-east), with speeds of 0.75 m/s during high tide and 0.25 m/s during low tide. The central and southern areas of the APBS have a moderate to high navigation safety risk index. Overall, these results confirm that surface currents and seabed morphology play an important role in ship stability and manoeuvrability, so they should be primary considerations in the planning, arrangement, and management of shipping lanes. Thus, this study not only produces scientific information about surface current patterns in the APBS, but also serves as an example of the application of professionalism, ethics, and K3L culture in marine engineering practices.

Key words: *professionalism, ethics, Occupational Safety and Health and the Environment culture*

PENDAHULUAN

Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) merupakan jalur strategis yang menghubungkan Laut Jawa dengan Pelabuhan Tanjung Perak, Pelabuhan Gresik, serta kawasan industri di sekitarnya. Tingginya aktivitas pelayaran di wilayah ini menuntut adanya jaminan keselamatan navigasi, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi oseanografis, khususnya arus permukaan (Kendek dkk., 2024; Kuncowati dkk., 2025; Fauzi dkk., 2025).

Arus permukaan berperan penting dalam menentukan pergerakan dan manuver kapal, terutama pada perairan sempit dan dangkal (Syamsudin, 2015; Zhou dkk., 2020). Variasi arah dan kecepatan arus dapat meningkatkan risiko kecelakaan, seperti kandas dan tabrakan. Pola arus di APBS dipengaruhi oleh faktor alami seperti pasang surut, angin muson, dan morfologi dasar perairan, serta aktivitas manusia seperti pengerukan dan pembangunan infrastruktur pesisir yang dapat mengubah dinamika hidrodinamika (Triatmodjo, 2012; Mayers & Luther, 2020; Awaluddin dkk, 2024; Wang dkk., 2024; Huda dkk., 2024; Kusumawardani dkk., 2024; Noor dkk., 2025).

Pemodelan numerik hidrodinamika menjadi pendekatan efektif untuk menganalisis pola arus secara spasial dan temporal (Pronowo dkk., 2014), sehingga dapat mendukung identifikasi area berisiko dan perencanaan navigasi yang lebih aman (Röhrs dkk., 2023; Li dkk., 2023; Lan dkk., 2024; Altiparmaki dkk., 2024). Namun, kajian spesifik mengenai pola arus permukaan dan dampaknya terhadap stabilitas serta manuver kapal di APBS masih terbatas (Wisha dkk., 2019; Akbar dkk., 2023; Awaluddin dkk., 2024; Fauzi dkk., 2025).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola arus permukaan di APBS berdasarkan model numerik hidrodinamika untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik arah, kecepatan, dan distribusi arus permukaan yang dipengaruhi oleh dinamika pasang surut. Tujuan ini selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan *Sustainable Development Goals*, terutama tentang

penanganan perubahan iklim dan ekosistem lautan. Dalam pelaksanaannya, penelitian ini dilandasi oleh nilai profesionalisme dan etika keinsinyuran dengan menjunjung tinggi integritas ilmiah, akurasi data, serta tanggung jawab sosial terhadap keselamatan pelayaran dan berkelanjutan lingkungan laut (Triatmodjo, 2012; Syamsudin, 2015; Muttaqin & Utomo, 2020; Li dkk., 2023). Selain itu, setiap tahap kegiatan penelitian—mulai dari pengambilan data, pemodelan, hingga analisis hasil—dilakukan dengan memperhatikan prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L) untuk menjamin keamanan personel, perlindungan alat, dan pencegahan dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan informasi ilmiah tentang pola arus permukaan di APBS tetapi juga menjadi contoh penerapan profesionalisme, etika, dan budaya K3L dalam praktik keinsinyuran kelautan.

METODE PENELITIAN

APBS merupakan jalur laut utama yang menghubungkan Laut Jawa dengan Pelabuhan Tanjung Perak, Terminal Teluk Lamong, serta kawasan industri Gresik dengan posisi koordinat 07°09'–07°19' LS dan 112°36'–112°47' BT (Gambar 1). Jalur ini memiliki panjang sekitar 25 km dan lebar bervariasi antara 150-250 m dengan kedalaman rata-rata 9-13 m setelah proses pengerukan (*dredging*) rutin.

Dinamika arus di APBS disimulasikan dengan menggunakan persamaan hidrodinamika (Pers. 1, 2, dan 3) (Amirullah dkk., 2014; Sri Suharyo & Adrianto, 2018). Persamaan kekekalan momentum horizontal dan persamaan kontinuitas dengan kedalaman adalah (Pers. 1):

$$h = \eta + d \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan perairan dangkal sebagai berikut (Pers. 2)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hs \dots\dots\dots (2)$$

sehingga (pers. 3 dan 4)

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_o}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_o}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS \dots\dots\dots (3)$$

dan

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = f\bar{u}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_o}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_o}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \dots\dots\dots (4)$$

dengan rata-rata kecepatan di tiap kedalaman (pers. 5)

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dx; \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dx \dots\dots\dots (5)$$

Gaya gesek lateral τ_{ij} termasuk gesekan viscous, gesekan turbulen, dan adveksi didekati dengan Pers. 6.

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

- t = waktu (s)
- x, y, z = koordinat Cartesien
- η = elevasi (m)
- d = kedalaman (m)
- u, v, w = kecepatan dalam arah x, y, z
- f = $2\Omega \sin \phi$ = parameter Coriolis
- g = gravitasi ($m \cdot s^{-2}$)
- ρ = densitas air (kg/m^3)
- $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ = tensor stress radiasi
- ρ_0 = densitas air referensi (kg/m^3)



Gambar 1. Lokasi penelitian (Alur Pelayaran Barat Surabaya)

Input dalam simulasi model hidrodinamika adalah data batimetri, pasang surut, angin, dan gelombang yang diklasifikasikan permusim (Tabel 1).

Tabel 1. Data yang digunakan sebagai input dalam simulasi model hidrodinamika

No	Bahan	Alat	Fungsi	Sumber
1	Data Batimetri	<i>Arcgis</i> <i>SagaGis</i> <i>Global Mapper</i>	Memetakan dan mengetahui kedalaman dasar laut pada area tertentu.	https://download.gebco.net/
2	Data Pasang Surut		Memperoleh informasi mengenai tinggi muka air laut saat pasang dan surut.	https://srgi.big.go.id/
3	Data Angin	<i>Ocean Data View</i> <i>WRPLOT View</i>	Mengidentifikasi pola sebaran arah dan kekuatan angin di suatu wilayah.	https://www.ecmwf.int/
4	Data Gelombang	<i>Ocean Data View</i> <i>WRPLOT View</i>	Mengetahui tinggi dan arah pola gelombang	https://www.ecmwf.int/

Data kedalaman berfungsi untuk menggambarkan kondisi perairan di lokasi kajian. Selain itu, data kedalaman juga dapat digunakan untuk mengetahui kemiringan dasar laut (*slope*) dengan menggunakan Persamaan 1 (Esteban dkk., 2016):

$$slope = \frac{\Delta z}{\Delta x} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

Δz = perubahan kedalaman (m)

Δx = perubahan jarak horizontal (m)

Hasil perhitungan nilai *slope* tersebut kemudian dikategorikan berdasarkan klasifikasi tingkat kemiringan dasar laut (Esteban dkk., 2016) yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi kemiringan dasar laut (Esteban dkk., 2016)

Katagori	Nilai <i>slope</i>	Keterangan
Sangat landai	< 0,5	Pesisir, estuari, alur pelayaran delta
Landai	0,5-2	Pantai terbuka dengan energi gelombang moderat
Agak curam	2-5	Lereng kontinen bagian atas
Curam	5-15	Lereng kontinen, kaki <i>slope</i>
Sangat curam	> 15	Palung laut, tebing bawah laut

Data pasang surut berfungsi untuk menentukan elevasi muka air laut yang menjadi salah satu parameter penting dalam simulasi hidrodinamika. Di samping sebagai *input* model, data pasang surut ini juga akan menghasilkan elevasi muka air laut tertinggi dan terendah dalam satu siklus pasang surut dan biasa disebut dengan *Highest High Water Level* (HHWL) dan *Lowest Low Water Level* (LLWL). Nilai HHWL dan LLWL merupakan komponen penting untuk berbagai perhitungan, seperti desain bangunan pantai atau pelabuhan. Nilai HHWL dan LLWL juga sering dibandingkan dengan *Mean Sea Level* (MSL) atau muka air rata-rata. Saat air laut surut, kedalaman total perairan APBS ditentukan berdasarkan nilai LLWL sebagai acuan muka air terendah (IHO, 2005). Data tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran batimetri untuk memperoleh gambaran kondisi aktual dasar perairan (Siringoringo & Santosa, 2015)

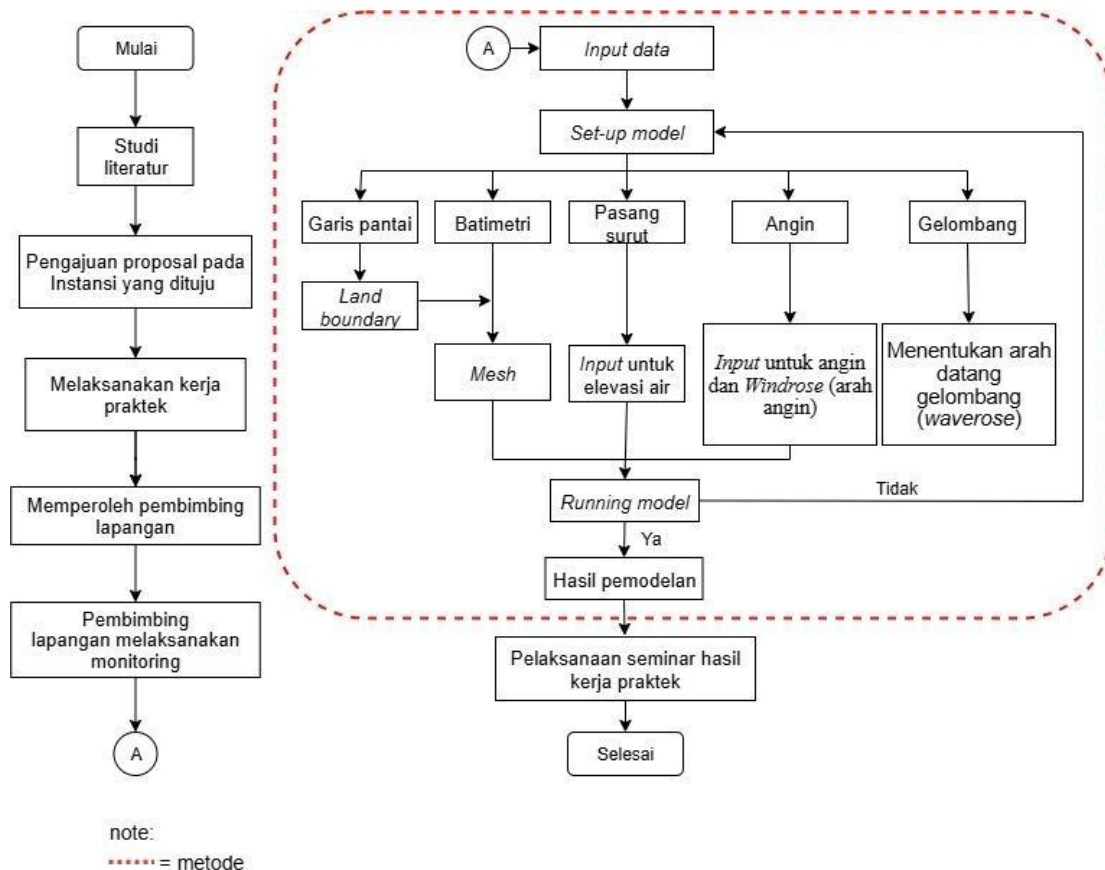
Data angin diolah dengan menggunakan perangkat lunak WRPLOT: <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/> guna menghasilkan *windrose* yang menggambarkan pola arah dan kecepatan angin. *Windrose* ini berfungsi sebagai informasi pendukung yang melengkapi analisis. Selain itu, angin berfungsi juga sebagai gaya penggerak arus permukaan dalam simulasi model numerik hidrodinamika.

Luaran model numerik hidrodinamika tersebut adalah pola arus permukaan yang ditampilkan dalam bentuk dua dimensi (spasial dan temporal) (Putra & Pratomo, 2019; Watofa dkk., 2021). Selanjutnya, luaran tersebut dianalisis area yang mempunyai kedalaman yang dangkal dan mempunyai kecepatan arus yang tinggi. Analisis ini diperlukan untuk menilai potensi resiko dan keselamatan pelayaran secara akurat (Huang dkk., 2023).

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini bertujuan untuk memahami hubungan antara pola arus permukaan, kondisi pasang surut, kedalaman perairan, serta tingkat risiko terhadap keselamatan pelayaran di APBS. Analisis dilakukan melalui beberapa tahapan yang bersifat deskriptif, komparatif, dan sebab-akibat (kausal).

Analisis deskriptif dilakukan untuk menggambarkan karakteristik fisik dan hidrodinamika perairan di lokasi penelitian. Hasil analisis deskriptif digunakan untuk memahami kondisi umum dan karakteristik fisis perairan yang menjadi dasar penilaian tahap berikutnya. Analisis komparatif digunakan untuk membandingkan kondisi arus antar fase pasang surut dan antar area penelitian. Perbandingan spasial dan temporal diperlukan untuk menentukan arah dominan dan kecepatan maksimum pola arus saat fase pasang dan surut. Selain itu, variasi akibat perubahan kedalaman dan bentuk alur dapat diperoleh dengan membandingkan karakteristik arus antara bagian utara, tengah, dan selatan APBS. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana model mampu

merepresentasikan kondisi nyata serta perbedaan hidrodinamika antar wilayah yang berpotensi mempengaruhi keselamatan pelayaran. Analisis sebab-akibat diterapkan untuk menilai pengaruh arus permukaan terhadap keselamatan pelayaran, khususnya terhadap stabilitas dan kemampuan manuver kapal. Secara keseluruhan, metodologi telah dirangkum menjadi bagan alir yang ditunjukkan dalam Gambar 2.

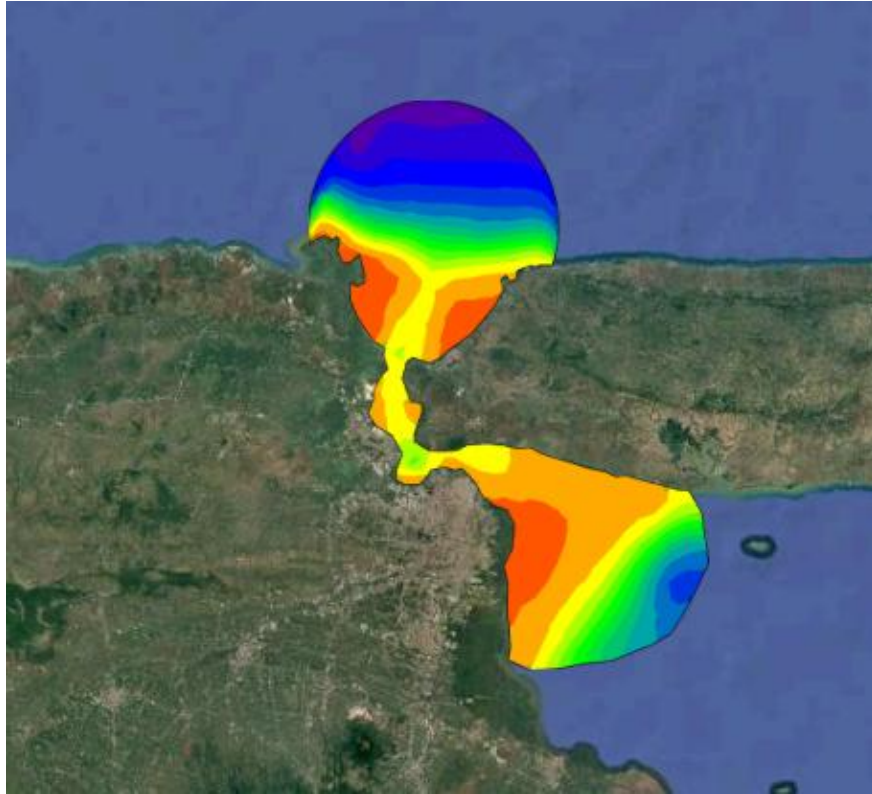


Gambar 2. Bagan alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perairan APBS memiliki kedalaman 5-30 m yang dibagi dalam dua area, yaitu area di utara APBS (berbatasan langsung dengan Laut Jawa) dan area di timur dan tenggara APBS (berbatasan langsung dengan Selat Madura) (Gambar 3). Area pertama, terutama di dekat daratan Pulau Jawa dan Pulau Madura memiliki kedalaman 7-10 m (jingga dan coklat) namun dibagian tengahnya memiliki kedalaman 10-15 m (kuning). Selain itu, di perbatasan Gresik dan Surabaya (timur Gresik dan utara Surabaya), kedalaman mencapai 20 m (hijau muda). Area kedua, kedalaman mencapai 20 m (kuning) di dekat Surabaya, namun berangsur-angsur menjadi dangkal (coklat) bahkan

sampai 5 meter di timur Surabaya dan Sidoarjo (merah). Selanjutnya, kedalaman berangsur-angsur menjadi semakin dalam ke arah timur (kuning).

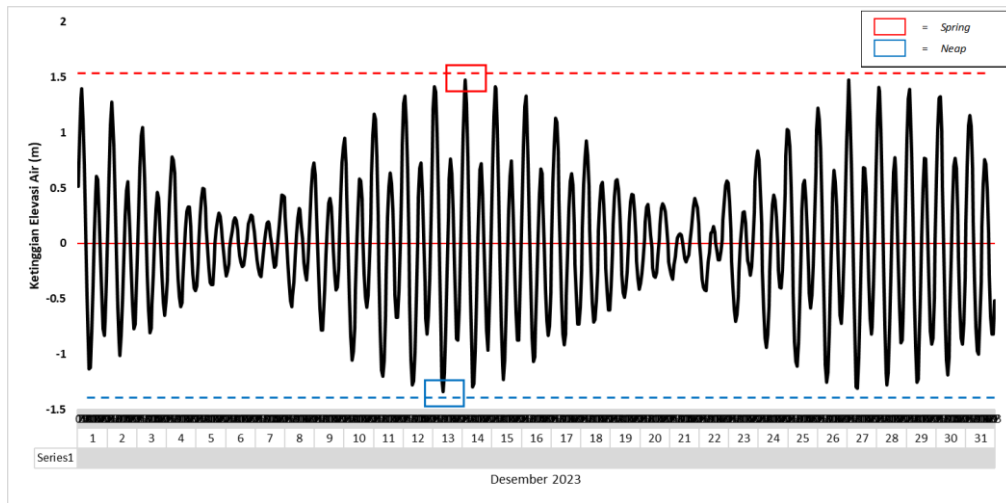


Gambar 3. Batimetri di sekitar APBS

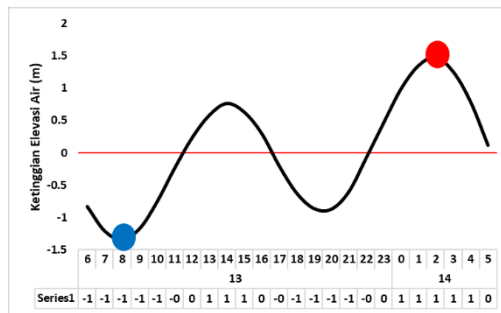
Alur Pelayaran Barat Surabaya memiliki kemiringan (*slope*) sebesar 0,001. Berdasarkan klasifikasi tingkat kemiringan dasar laut (Esteban dkk., 2016) maka termasuk kategori sangat landai. Nilai ini menggambarkan bahwa perubahan kedalaman sepanjang alur sangat kecil sehingga kondisi perairan cenderung datar dan aman untuk aktivitas pelayaran.

Secara hidrodinamika, perairan ini dipengaruhi oleh pasang surut semi diurnal (campuran condong ke harian ganda), yaitu suatu fenomena naik turunnya air laut sebanyak dua kali pasang dan dua kali surut dalam 24 jam dengan ketinggian air yang tidak teratur. Data pasang surut/elevasi menunjukkan bahwa tunggang air tertinggi terjadi di musim barat, tepatnya di Desember 2023, yaitu: 2,8 m (Gambar 4). Demikian juga dengan HHWL dan LLWL (1,48 m di atas MSL dan 1,34 m di bawah MSL) juga terjadi di Desember 2023. Detail nilai HHWL dan LLWL ditunjukkan dalam Tabel 3. Oleh karena itu, pengguna APBS wajib untuk memperhatikan batimetri dan LLWL untuk kapal agar tidak karam guna keselamatan penumpang.

a. Elevasi air laut



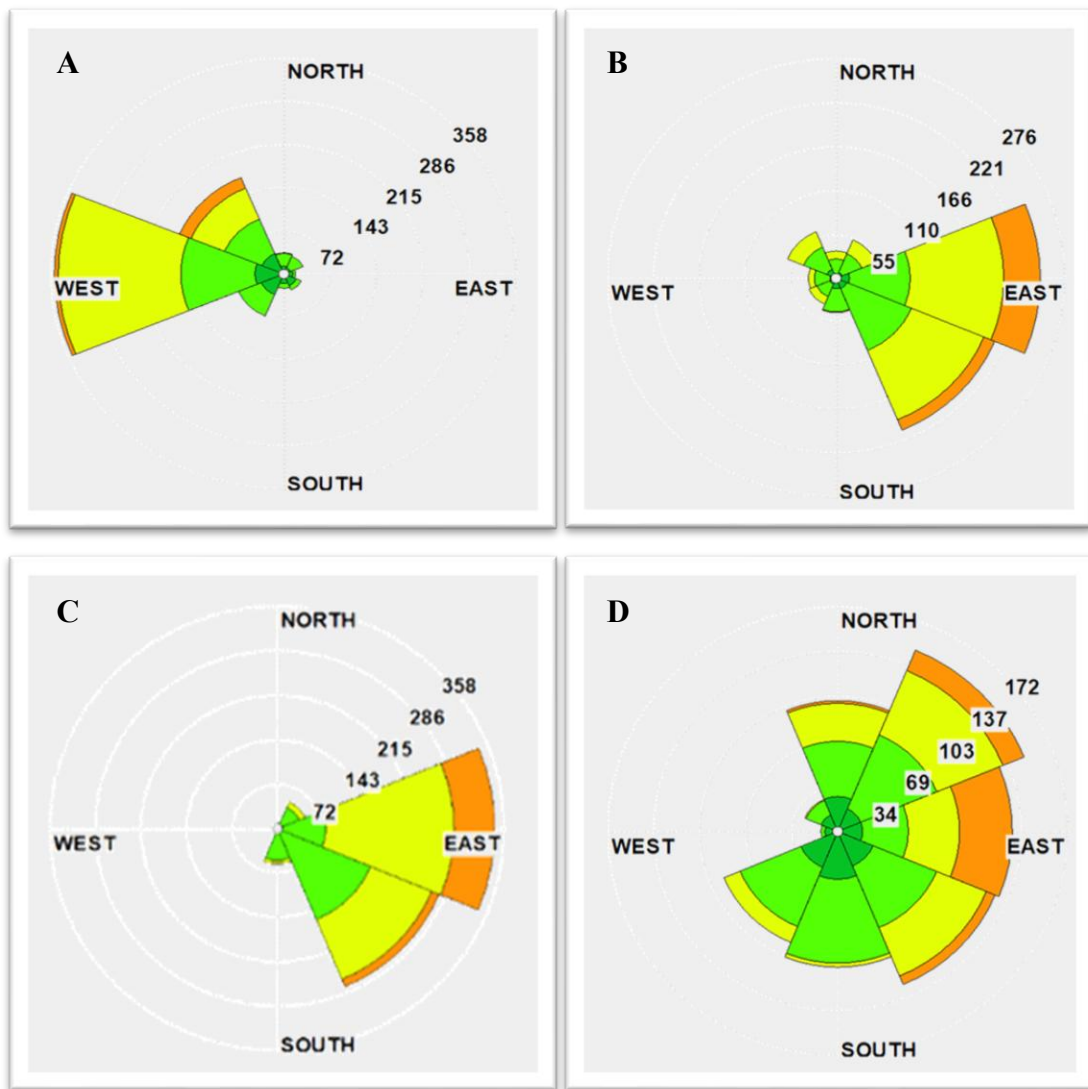
b. Elevasi saat pasang purnama



Gambar 4. a. Elevasi air laut di APBS pada Desember 2023; b. Elevasi saat pasang purnama di Desember 2023.

Tabel 3. Kondisi pasang surut di APBS.

Bulan	Pasang tertinggi (m) di atas MSL	Surut tersurut (m) di bawah MSL	Tunggang Air (m)
Januari	1,48	1,34	2,82
Februari	1,36	1,28	2,63
Maret	1,23	1,20	2,43
April	1,24	1,11	2,35
Mei	1,34	1,24	2,58
Juni	1,36	1,22	2,58
Juli	1,21	1,11	2,32
Agustus	1,11	1,07	2,18
September	1,00	0,98	1,99
Oktober	1,30	1,21	2,51
November	1,39	1,30	2,69
Desember	1,42	1,29	2,71



Gambar 5. Mawar angin (*windrose*) pada: A. muson barat, B. muson peralihan 1, C. muson timur, D. muson peralihan 2

Arah angin pada muson barat dominan berasal dari barat laut dengan kecepatan 6-8 m/s. Kondisi ini terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara antara benua Asia yang mengalami tekanan udara yang tinggi dan benua Australia yang mengalami tekanan udara rendah. Angin bergerak dari Asia menuju Australia terjadi antara Oktober hingga April, melintasi Samudra Hindia. Demikian juga arah angin selalu bergerak dari wilayah bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan rendah (Gambar 5A).

Selanjutnya, angin mengalami peralihan (muson peralihan 1) yang menandai transisi dari angin muson barat ke angin muson timur. Di fase ini, angin tidak lagi bertiup dominan dari satu arah, melainkan dari beberapa arah (Gambar 5B). Fenomena ini terjadi karena adanya perubahan tekanan udara. Saat matahari lebih banyak menyinari

belahan Bumi utara, tekanan udara di Asia menjadi rendah sedangkan di Australia tekanan udaranya tinggi. Angin mengalami pelemahan ketika melewati garis khatulistiwa sehingga kecepatannya menjadi sangat rendah. Angin menjadi tidak teratur, berasal dari timur serta tenggara dengan kecepatan 6-8 m/s.

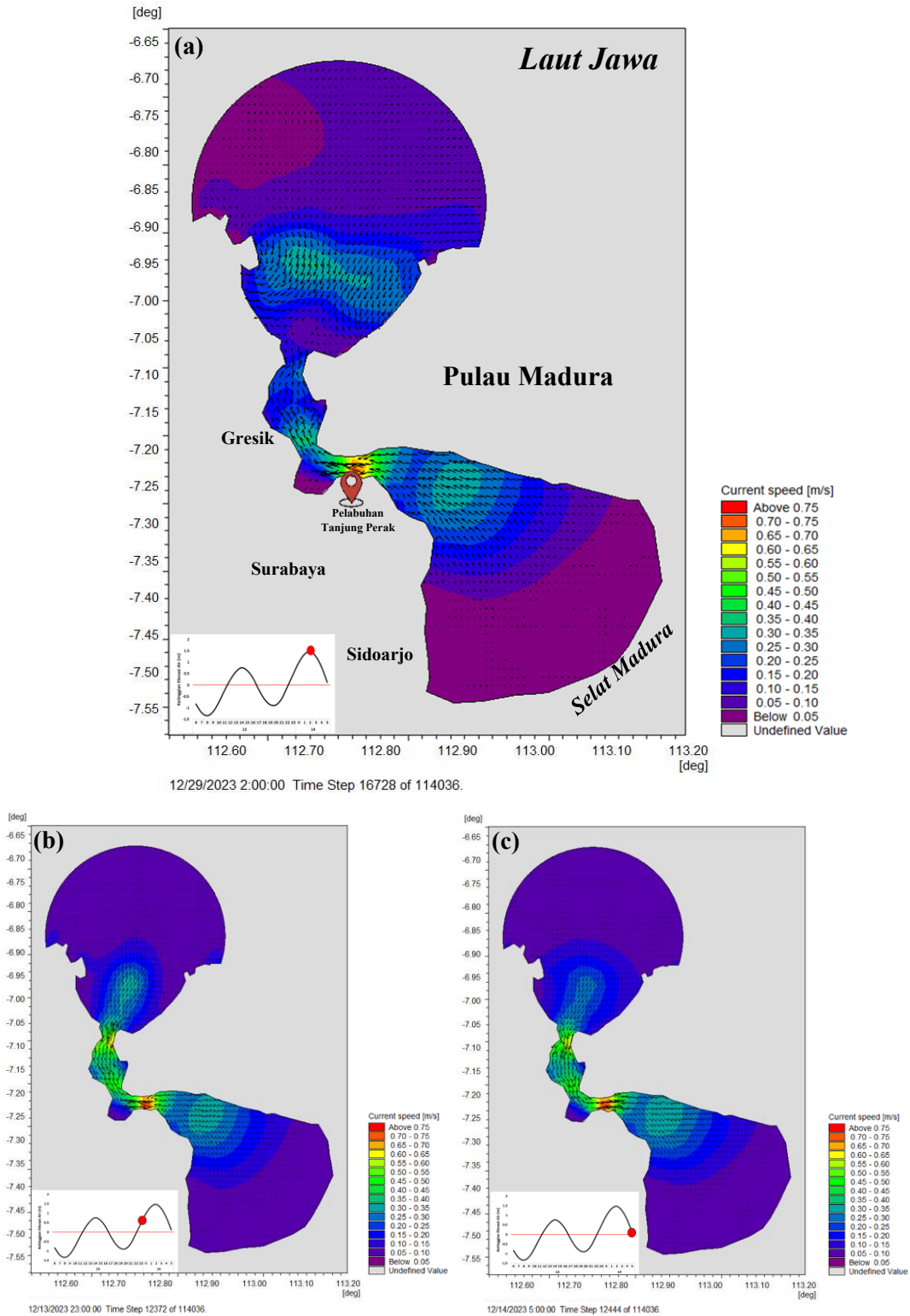
Di muson timur ini, Matahari berada di belahan Bumi utara sehingga tekanan udara di Australia lebih tinggi sementara tekanan udara di Asia lebih rendah. Perbedaan tekanan ini mendorong angin bertiup dari Australia ke Asia melalui Indonesia dengan kecepatan 6-8 m/s di APBS (Gambar 5C). Kondisi muson peralihan 2 tidak berbeda jauh dengan muson peralihan 1. Kecepatan angin melemah, berkisar 4-6 m/s dengan arah yang lebih tidak teratur bila dibandingkan muson peralihan 1 (Gambar 5D).

Dalam hasil dan pembahasan ini, hasil simulasi arus permukaan difokuskan pada Desember untuk mewakili puncak Musim Barat ketika angin barat, curah hujan, dan debit daratan berada pada kondisi maksimum sehingga memengaruhi arus secara paling kuat. Simulasi arus permukaan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa arus di APBS didominasi oleh pasang surut bertipe semi-diurnal, dengan dua kali pasang dan dua kali surut per hari. Pada fase menuju pasang, arus mengalir dari Selat Madura ke Laut Jawa dan mencapai kecepatan lebih dari 0,75 m/s pada puncak pasang (27 Desember 2023), kemudian berbalik arah saat fase surut. Kecepatan arus tertinggi terjadi di bagian tengah alur yang lebih sempit, sementara kecepatan menurun ke arah tepi akibat pengaruh gesekan dasar dan hambatan struktur pelayaran seperti dermaga dan tiang pancang.

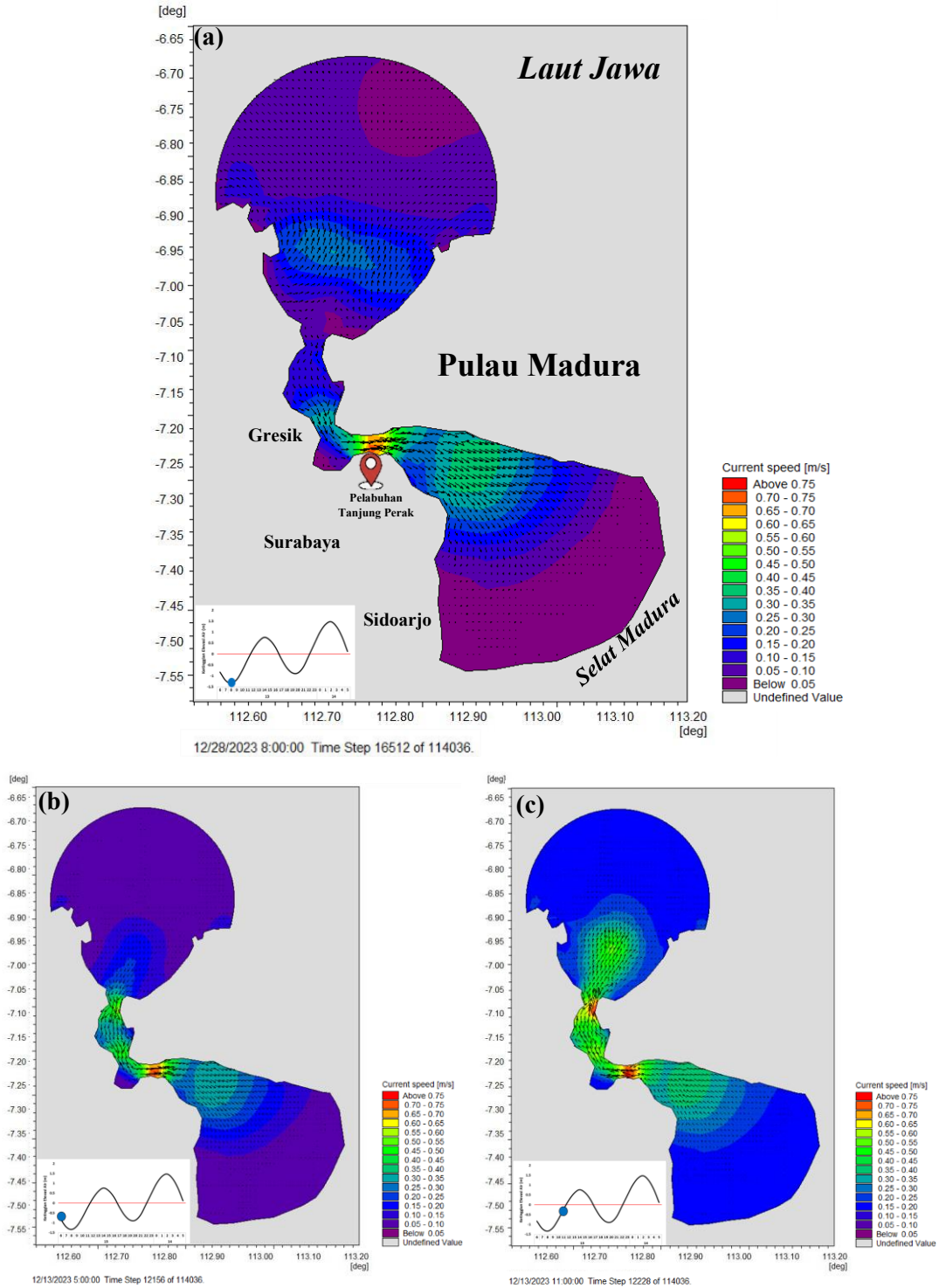
Saat surut terendah, perairan sempit seperti APBS memiliki dinamika arus yang sangat dipengaruhi oleh bentuk alur dan kondisi pasang surut. Mengacu pada Dronkers (2005), daerah seperti ini umumnya menunjukkan perubahan arus yang cepat baik secara ruang maupun waktu. Pada fase surut tersurut, aliran bergerak dari arah selatan menuju Laut Jawa, dan distribusi arus di sepanjang alur tidak seragam. Perbedaan ini muncul karena variasi kemiringan dasar laut (slope), kedalaman, serta kontur alur yang memengaruhi arah dan penyebaran arus. Bagian alur yang lebih dangkal atau tidak rata dapat menyebabkan perubahan arah lokal, sedangkan bagian yang lebih dalam memfasilitasi aliran yang lebih langsung menuju utara.

Kecepatan arus pada fase surut tersurut juga menunjukkan kontras yang jelas antar wilayah. Nilai tertinggi muncul di bagian penyempitan alur, yaitu sekitar 0,25–0,30 m/s, karena aliran terfokus pada penampang yang lebih kecil sehingga kecepatannya meningkat. Sebaliknya, pada area yang lebih lebar arus melemah hingga kurang dari 0,10 m/s akibat pelebaran penampang dan meningkatnya pengaruh gesekan dasar. Pola ini tampak pada Gambar 7, arus terkuat berada di tengah alur dan meluruh menuju

tepi. Kondisi tersebut diperkuat oleh keberadaan struktur pelayaran, seperti dermaga atau tiang pancang, yang menambah hambatan aliran dan membuat distribusi arus menjadi semakin tidak seragam.



Gambar 6. Pola arus permukaan saat: (a). pasang purnama; (b) sebelum pasang purnama; (c) sesudah pasang purnama



Gambar 7. Pola arus permukaan saat: (a). surut purnama; (b) sebelum surut purnama; (c) sesudah surut purnama

Arus permukaan memiliki pengaruh langsung terhadap stabilitas dan kemampuan manuver kapal, terutama di perairan sempit. Arus yang melintang terhadap haluan kapal (*cross current*) dapat menimbulkan gaya lateral yang menyebabkan

penyimpangan jalur atau *yawing* (IMO, 2019). Rahmawati dkk. (2022) menyatakan bahwa arus dengan kecepatan di atas 0,5 m/s dapat meningkatkan risiko kecelakaan saat kapal melakukan manuver masuk atau keluar pelabuhan. Selain itu, van der Wegen dan Roelvink (2018) menegaskan bahwa perubahan pola arus akibat pendangkalan (*shoaling*) dapat memperbesar gaya hidrodinamik pada lambung kapal dan mempengaruhi efisiensi navigasi.

Selain faktor pasang surut dan angin, arus di kawasan ini juga dipengaruhi oleh aliran sungai Surabaya dan Kali Lamong yang membawa sedimen ke badan air utama, menyebabkan pendangkalan dan pergeseran pola arus lokal. Dalam tiga tahun terakhir (2021-2024), beberapa laporan menyebutkan peningkatan insiden navigasi. Pertama: enam kasus kapal kandas di area tikungan dekat *buoy* 13-15 (data Distrik Navigasi I Surabaya, 2024). Kedua: tiga kasus deviasi lintasan kapal kontainer besar akibat arus lintang kuat saat manuver masuk alur. Ketiga: penurunan kedalaman lokal sebesar 0,4-0,8 m di segmen tengah akibat sedimentasi. Faktor-faktor tersebut menunjukkan bahwa pola arus permukaan di APBS memiliki peran signifikan terhadap keselamatan pelayaran, khususnya bagi kapal dengan *draft* besar dan manuver terbatas.

Berdasarkan penjelasan diatas, perlu dibuat keputusan yang melibatkan banyak pihak, antara lain: instansi utama, pelaksana teknis, mitra riset dan teknis, konsultan teknis. Tujuan pelibatan dalam pembuatan keputusan ini adalah untuk memperoleh peta pola arus permukaan aktual di sepanjang APBS menggunakan pemodelan numerik berbasis data lapangan, menganalisis pengaruh arus permukaan terhadap stabilitas pelayaran dan risiko deviasi lintasan kapal, menentukan zona rawan arus lintang (*cross current*) yang berpotensi mengganggu manuver kapal, menyusun rekomendasi teknis berupa penyesuaian jalur pelayaran, pemasangan Sarana Bantu Navigasi Pelayaran (SBNP) tambahan, atau kebijakan waktu lintasan aman berdasarkan hasil model. Kriteria keputusan ini sangat terkait dengan stabilitas arus (arah dan kecepatan arus permukaan tidak melebihi ambang batas manuver kapal besar ($\leq 0,5$ m/s)), kedalaman minimum (kedalaman operasional ≥ 12 m pada seluruh segmen alur), keselamatan navigasi (penurunan jumlah insiden pelayaran ≥ 50 % dalam satu tahun setelah mitigasi diterapkan), validasi model (RMS *error* hasil simulasi terhadap data lapangan ≤ 10 %), efisiensi operasional (tidak ada peningkatan waktu tunggu kapal > 15 % akibat perubahan kebijakan alur).

Berdasarkan hasil analisis hidrodinamika, pemodelan numerik, dan identifikasi area berisiko, berikut rekomendasi utama untuk peningkatan keselamatan pelayaran di APBS: teknis dan operasional, pemodelan dan pemantauan, model numerik terintegrasi

(2D–3D), rekomendasi infrastruktur dan rekayasa fisik, manajemen dan kebijakan, sosialisasi dan kapasitas

KESIMPULAN

Pola arus permukaan di APBS berdasarkan model hidrodinamika menunjukkan bahwa musim barat merupakan periode dengan arus paling kuat saat laut dalam kondisi pasang (0,75 m/s), ditandai kecepatan arus yang lebih tinggi dibandingkan musim peralihan maupun musim timur. Sementara itu, kecepatan arus saat surut melemah (0,25-0,30 m/s). Pada musim barat, arus bergerak dominan dari barat–barat daya menuju timur–timur laut, dipengaruhi oleh kombinasi angin muson barat dan kondisi pasang purnama. Pengaruh arus permukaan terhadap keselamatan pelayaran bersifat signifikan, terutama saat musim barat. Arus yang lebih kuat pada periode ini meningkatkan risiko kandas, deviasi lintasan, serta gangguan manuver, khususnya bagi kapal besar dengan *draft* besar. Kondisi ini menjadikan musim barat sebagai musim paling kritis bagi pelayaran di APBS karena kecepatan arus mendekati atau melebihi ambang batas manuver aman kapal.

SARAN

Kondisi arus pada bulan Desember yang mewakili musim barat perlu diperhatikan secara khusus, karena periode ini menunjukkan arus permukaan paling kuat sekaligus elevasi muka air yang berfluktuasi tajam. Informasi ini penting sebagai bahan pertimbangan dalam evaluasi risiko navigasi di APBS. Kapal dengan *draft* besar sebaiknya memperhitungkan waktu melintas berdasarkan kondisi pasang tertinggi pada musim barat, mengingat tingginya risiko dasar kapal menyentuh perairan terdangkal ketika arus kuat berinteraksi dengan kedalaman minimum alur.

.UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dukungannya kepada Universitas Hang Tuah dan Program Studi Profesi Indonesia, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

REFERENSI

Akbar, H. I., Harsono, G., Sutejo, B., Pianto, T. A., Rudiastuti, A. W., Ambarwulan, W., Sumargana, L., Priyadi, H., Hudayat, N., & Sugama, A. Y. (2023). Studi pendahuluan pengaruh arus laut musiman terhadap waktu tempuh kapal melalui perairan Selat Lombok. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 5(2), 91-98.

- Altiparmaki, O., Breivik, Ø, Aouf, L., Bohlinger, P., Johannessen, J. A., Collard, F., Donlon, C., Hope, G., Visser, P. A. A. M., & Naeije, M. (2024). Influence of ocean currents on wave modelling and satellite observations: Insights from the one ocean expedition. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129.
- Amirullah, A. N., Sugianto, D. N., & Indrayanti, E. (2014). Kajian pola arus laut dengan pendekatan model hidrodinamika dua dimensi untuk pengembangan pelabuhan Kota Tegal. *Journal of Oceanography*, 3(4), 671-682.
- Awaluddin, Santosa, Y. N., Bakri, M., Hawati, H., Malik, K., & Pranowo, W. S. (2024). Modeling simulation of tidal flows in Jakarta Bay Waters. *PONGGAWA: Journal of Fisheries Socio-Economic*, 4(2), 122-137.
- Dronkers, J. (2005). *Dynamics of coastal systems*. World Scientific Publishing.
- Esteban, F. D., Tassone, A., Menichetti, M., & Lodolo, E. (2017). Application of slope maps as a complement of bathymetry: example from the SW Atlantic. *Marine Geodesy*, 40(1), 57-71.
- Fauzi, I., Ariyanto, D., Murtiaji, C., Sukmana, C. I. & Cholishoh, E. (2025). Preliminary design of a traffic separation scheme at the hub port of IKN: Hydro-oceanographic analysis for navigational safety in the Makassar Strait. *Archives of Transport*, 73(1), 79-98.
- Huang, I. L., Lee, M. C., Nieh, C. Y., & Huang, J. C. (2023). Ship classification based on AIS data and machine learning methods. *Electronics*, 13(1), 98.
- Huda, A. C., Putri, D. L., Nurcholik, S. D., & Hasrina. (2024). Tidal current pattern modeling in the wain river shipping channel waters. *Indonesian Journal of Maritime Technology*, 2(1), 57-66.
- International Hydrographic Organization (IHO). (2005). *Manual on hydrography* (1st ed.). Monaco: IHO Publication C-13.
- International Maritime Organization (IMO). (2019). *Guidelines for under keel clearance for ships*. IMO Publishing.
- Kendek, M., Rachma, S., Filemon, F., & Widarbowo, D. (2024). Analysis of preventive measures on sailing safety in Indonesia. *Zona Laut: Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, 5(2), 140-145.
- Kuncowati, Wiyono, S. T., & Tamam, R. B. (2025). Shipping safety performance models on solid shipping lanes: An internal and environmental factors perspective. *Maritime Technology and Society*, 4(2), 44-55.
- Kusumawardani, N., Djamaluddin, R., Angmalisang, P. A., & Manu, L. & Pelle, W.E. (2024). Characteristics of sea surface current during the second transitional monsoon in the Bangka Strait, North Sulawesi, Indonesia. *Aquatic Science & Management*, 12(1), 7-13.
- Lan, Z., Gang, L., Zhang, M., Xie, W., & Wang, S. (2024). A multi-stage collision avoidance model for autonomous ship based on fuzzy set theory with TL-DDQN algorithm. *Ocean Engineering*, 311(118912).
- Li. K., Zheng, F., Cheng, L., Zhang, T., & Zhu, J. (2023). Record-breaking global temperature and crises with strong El Niño in 2023-2024. *The Innovation Geoscience*, 1(2), 1-2.
- Meyers, S. D. & Luther, M. (2020). The impact of the sea level rise on maritime navigation within a large, channelized estuary. *Maritime Policy & Management*, 47(1), 1-17.

- Muttaqin, S., & Utomo, C. (2020). Probability scale of vessel risks on a shipping company. *IPTEK Journal of Proceedings Series No (1)*.
- Noor, F. M., Handani, D. W., Muryadin, M., Sari, D. P., Wijaya, R. D. S., Prasetyo, D. F., Setiyobudi, N., Putra, A. M. F., Malakani, A. I., & Afandi, M. I. (2025). Risk analysis of ship collision and modelling of oil spill trajectory study case: Dumai Port. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, 22(1), 19-33.
- Pranowo, W. S., Puspita, C. D., Bramawanto, R., Adi, R. A., Kusumawardani, A. R. T. D. (2014). Dinamika arus dalam mendukung perikanan budidaya luas di Teluk Bone. *Jurnal Harpodon Borneo*, 7(2), 135-152.
- Putra, H. P., & Pratomo, D. G. (2019). Analisis tipe pasang surut menggunakan metode Formzahl di perairan pesisir. *Jurnal Oseanografi Tropis*, 4(1), 45–53.
- Rahmawati, I., Wibowo, A., & Sutopo, H. (2022). Analisis risiko hidrodinamika terhadap keselamatan pelayaran di Perairan Semarang. *Jurnal Transportasi Laut*, 9(2), 101–112.
- Röhrs, J., Sutherland, G., Jeans, J., Bedington, M., Sperrevik, A. K., Dagestead, K., Gusdal, Y., Mauritzen, C., Dale, A., & LaCasce, J. H. (2023). Surface currents in operational oceanography: Key applications, mechanisms, and methods. *Journal of Operational Oceanography*, 16(1), 60-88.
- Siringoringo, H., & Santosa, W. (2015). Analisis penentuan kedalaman alur pelayaran dengan koreksi pasang surut. *Jurnal Teknik Hidro*, 7(2), 45–54.
- Sri Suharyo, O., & Adrianto, D. (2018). Studi hasil running model arus permukaan dengan software numerik Mike 21/3 (guna penentuan lokasi penempatan stasiun energi arus Selat Lombok (Nusapenida). *Applied Technology and Computing Science Journal*, 1(1), 30–38. <https://doi.org/10.33086/atcsj.v1i1.8>
- Syamsudin, F. (2015). *Pemodelan oseanografi untuk aplikasi teknik kelautan*. Bandung: ITB Press.
- Triatmodjo, B. (2012). *Oseanografi teknik*. Yogyakarta: Beta Offset.
- van der Wegen, M., & Roelvink, D. (2018). Morphodynamic modeling of tidal channels and navigation safety in the Port of Rotterdam. *Coastal Engineering Journal*, 60(1), 45–63.
- Wang, Y., Zhong, Y., Li, S., Chen, W., Zhou, M. (2024). Tidal and residual currents in the inner shelf of East China Sea detected from underway ADCP observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 306.
- Watofa, M. B., Muslim, M., & Wissha, U. J. (2021). Simulasi numerik arus pasang surut menggunakan model hidrodinamika 2D di perairan pesisir Jayapura. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(1), 29–40.
- Wissha, U.J., & Ilham. (2019). Velocity components of currents and transport mechanism in the le Meulee Waters, Weh Island, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(2), 93-102.
- Zhou, M. (2020). Variability of the observed deep western boundary current in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 50, 2953-2963.