

Karakter Perairan Kepulauan Sula dan Taliabu berdasarkan Pemodelan Hidrodinamika 3D

Ezikri Yasra¹, Dwi Haryo Ismunarti^{1*}, Widodo Setiyo Pranowo^{2,3}, Johar Setiyadi³

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. H. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang 50275 Indonesia

²Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan Sumber Daya Manusia, Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik
Indonesia, Jl. Pasir Putih II Ancol Timur, Jakarta. 14430 Indonesia

³Program Studi Hidrografi, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut
Gedung Mahameru Jl. Pantai Kuta V No.1 Ancol Timur Jakarta 14430 Indonesia

Email : dwiharyois@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Perairan Kepulauan Sula dan Taliabu merupakan perairan yang memisahkan dua laut dalam di bagian utara dan selatan kepulauan, Laut Maluku dan Laut Banda, dengan tiga pulau besar utama yaitu Pulau Mangoli, Pulau Taliabu, dan Pulau Sanana. Perairan tersebut memiliki dinamika yang kompleks dengan topografi dasar perairan yang tidak teratur dan adanya sill pada kolom perairan serta dilintasi oleh Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) pada Pintasan Lifamatola. Kompleksnya dinamika perairan dengan pengaruh pasang surut yang kuat menyebabkan diperlukan suatu kajian tersendiri untuk menguraikan berbagai fenomena oseanografi yang terjadi sehingga diperoleh berbagai pemahaman baru mengenai perairan tersebut. Pendekatan numerik melalui pemodelan hidrodinamika tiga dimensi dilakukan untuk mengetahui profil oseanografi perairan. Fokus utama dilakukan pada aspek arus laut dan pasang surut dengan penyederhanaan barotropik. Penelitian dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari ERA-5, PUSHIDROSAL, MIKE DHI, dan BRSDM KKP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perairan Kepulauan Sula dan Taliabu memiliki karakter pasang surut Campuran Condong Harian Ganda dengan dominansi konstituen Pasut pada bagian utara kepulauan adalah K1 dan pada bagian selatan kepulauan M2. Karakteristik arus memiliki sifat yang bervariasi diantara kecepatan maksimum dan rerata. Hasil model memperlihatkan bahwa kecepatan maksimum mencapai 5,555 m/s dengan kecepatan rata-rata tertinggi 2,373 m/s. Pola arus pada saat kecepatan maksimum bergerak menuju utara sedangkan pada kecepatan rerata arus bergerak condong ke arah barat dengan pergerakan menuju selatan.

Kata kunci : Barotropik, Hidrodinamika 3D, Kepulauan Sula - Taliabu

Abstract

Ocean Characteristics of Sula and Taliabu Islands Based on 3D Hydrodynamic Modeling

The waters of the Sula and Taliabu Islands are waters that separate the two-deep seas in the northern and southern parts of the archipelago, the Maluku Sea and the Banda Sea, with three main large islands, namely Mangoli Island, Taliabu Island, and Sanana Island. These waters have complex dynamics with irregular bottom topography and sill in the water column and crossed by the Indonesian Through Flow (ARLINDO) on the Lifamatola Passage. The complexity of the dynamics of the waters with strong tidal influences requires a separate study to describe the various oceanographic phenomena that occur so that new understandings of these waters are obtained. A numerical approach through three-dimensional hydrodynamic modeling is carried out to determine the oceanographic profile of the waters. The main focus is on the aspects of ocean currents and tides with barotropic simplification. The study was conducted using secondary data obtained from ERA-5, PUSHIDROSAL, MIKE DHI, and BRSDM KKP. The results showed that the waters of the Sula and Taliabu Islands have a Mixed Tide Prevailing Semi diurnal with the predominance of the Tidal constituents in the northern part of the archipelago K1 and the southern part of the islands M2. Current characteristics vary between maximum and average speeds. The model results show that the maximum speed reaches 5,555 m/s with the highest average speed of 2,373 m/s. The current pattern at the time of maximum

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v11i3.44100

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 13-01-2022

Disetujui/Accepted : 19-07-2022

speed moves towards the north while at the average speed the current moves towards the west with a movement towards the south.

Keywords: *Barotropic, 3D Hydrodynamics, Sula Islands - Taliabu*

PENDAHULUAN

Kepulauan Sula dan Taliabu merupakan dua kabupaten yang terletak di Provinsi Maluku Utara dimana wilayah ini terdiri dari tiga pulau besar yaitu Pulau Mongoli, Pulau Taliabu, dan Pulau Sanana (Permana *et al.*, 2012). Kondisi pulau yang terletak diantara dua laut dalam disisi utara dan selatan, Laut Maluku dan Laut Banda, menyebabkan perairan kepulauan ini memiliki karakteristik berbeda dibandingkan wilayah lainnya. Kasman *et al.* (2019) menyatakan bahwa kondisi perairan Kepulauan Sula memiliki keterkaitan dasar perairan yang relatif tajam dengan pertambahan kedalaman hingga 3500 meter dengan jarak 4 mil dari garis pantai. Selain itu pada wilayah ini juga terdapat Sill laut, *Lifamatola Sill*, yang memberikan pengaruh sangat besar bagi dinamika perairan melalui interaksi gelombang gravitasi, stratifikasi densitas perairan yang kuat, serta gerakan massa air yang terdisrupsi (Firdaus *et al.*, 2021). Selain batimetri perairan yang kompleks, perairan ini juga memiliki pengaruh pasang surut yang kuat yang diakibatkan oleh kondisi perairan yang lebih dalam dibandingkan dengan kawasan barat Indonesia. Kompleksnya geometri kepulauan, celah – celah sempit diantara pulau - pulau, kondisi dasar perairan kasar, serta penjalaran gelombang pasang surut dari Samudera Hindia dan Samudera Pasifik memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap dinamika perairan pada kawasan ini (Wei *et al.*, 2016). Kondisi perairan yang kompleks dengan pengaruh pasang surut yang kuat akan berpengaruh terhadap kondisi kolom perairan melalui interaksi gelombang internal akibat perlapisan massa air yang disebabkan oleh variasi salinitas dan temperatur. Kondisi fisik perairan, juga akan memberikan pengaruh terhadap proses pengadukan pada kolom perairan (Sjöberg dan Stigebrandt, 1992). Selain faktor tersebut perairan Kepulauan Sula terutama perairan disisi timur Pulau Lifamatola merupakan salah satu jalur yang menghubungkan dua massa air yang berbeda dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia sebagai pintu masuk massa air. Pada lapisan kedalaman, massa air masuk melewati perairan Kepulauan Sula melalui pintasan Lifamatola yang dikenal sebagai

pintu masuk ARLINDO II (Hasanudin, 1998). Selain itu perairan Kepulauan Sula dan Taliabu merupakan bagian dari sistem perairan kompleks Indonesia Timur juga dipengaruhi oleh arus monsun yang menyebabkan perairan sangat menarik untuk dilakukan pengkajian.

Kompleksnya fenomena perairan pada wilayah ini maka diperlukan suatu pendekatan numerik untuk menganalisis kondisi hidrodinamika yang terjadi. Melalui pendekatan tersebut diharapkan diperoleh gambaran besar tentang karakteristik perairan. Pendekatan numerik tiga dimensi berbasis sistem sigma dilakukan untuk mempertahankan kecepatan hingga dasar perairan sehingga diperoleh tren pengurangan kecepatan kedalaman hingga dasar perairan. Sistem sigma merupakan suatu sistem diskritisasi yang digunakan pada perairan laut dalam untuk mendapatkan transformasi perubahan kedalaman hingga dasar perairan dengan cara “meregangkan” domain vertikal sehingga dihasilkan diskritisasi yang lebih seragam dan halus pada dasar perairan (Zamani dan Koch, 2020). Selain itu, untuk mendapatkan resolusi geometri yang lebih tinggi pada wilayah kepulauan dan garis pantai yang kompleks maka *unstructured grid* diaplikasikan secara horizontal sehingga keseluruhan wilayah studi mampu didekati sesuai dengan kondisi sebenarnya (Sinha *et al.*, 2016). Pada penelitian ini, model dibangun dengan pendekatan barotropik dengan adanya keterbatasan data kolom perairan pada keseluruhan wilayah pembangunan model. Pendekatan Barotropik merupakan suatu pendekatan dimana pergerakan fluida merupakan fungsi tekanan, sehingga perlapisan perairan akibat variasi kedalaman oleh temperatur dan salinitas diabaikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik hidrodinamika perairan Kepulauan Sula dan Kepulauan Taliabu. Area kajian ditampilkan dalam Gambar 1.

MATERI DAN METODE

Materi pada penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data komponen *U-Wind*, *V-Wind*, dan *Surface Pressure* yang diperoleh dari laman ERA-5 dengan resolusi spasial 0,25 *degree* dan satu jam pada bulan Januari, April, Juli, dan

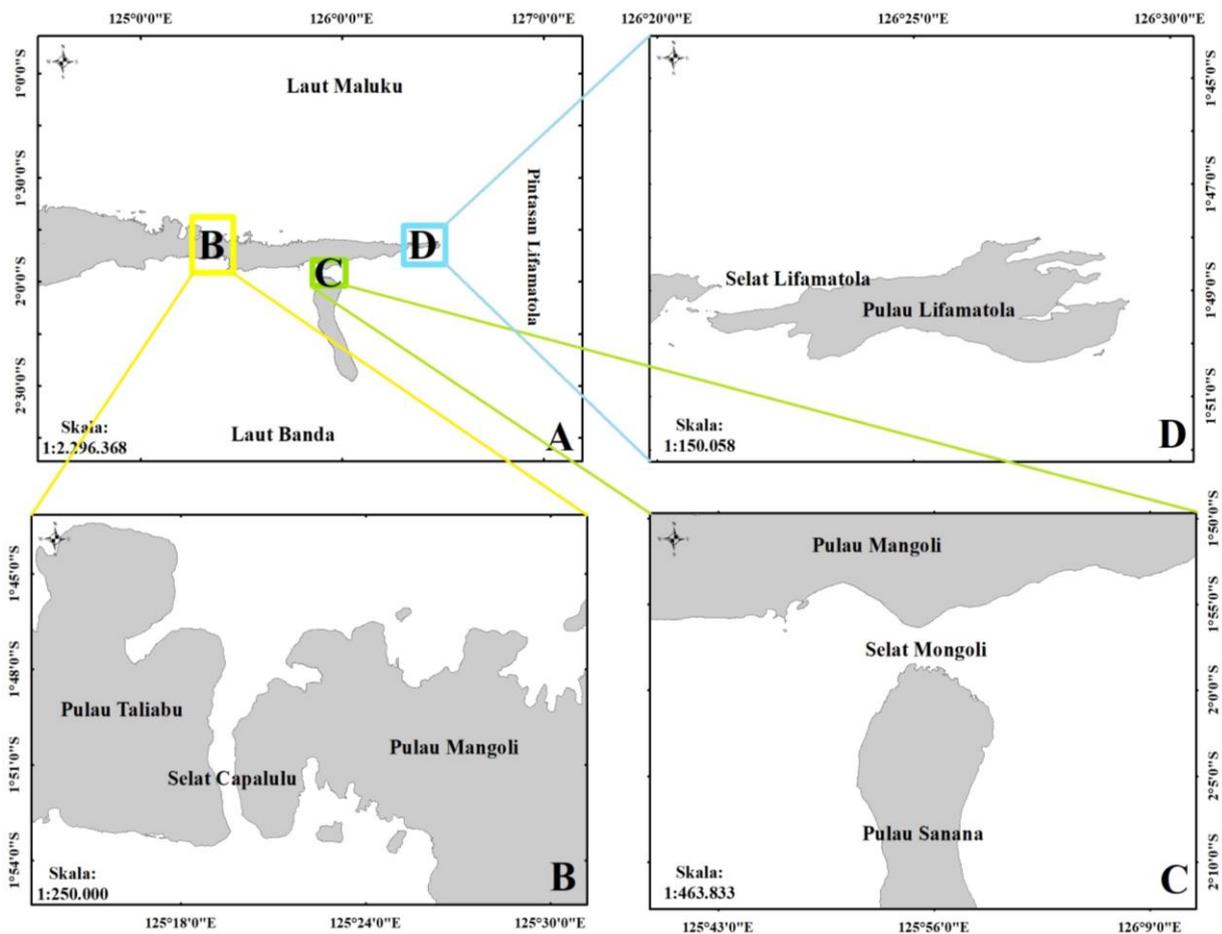
Oktober tahun 2004. Data batimetri dan garis pantai bersumber dari PUSHIDROSAL dengan No. Peta 275 dan 275 R4 dengan skala masing-masing 1:200000 dan 1:75000. Data kedalaman pada Pintasan Lifamatola diperoleh dari Peta lingkungan laut Nasional No.30 bersumber dari BIG dengan skala 1:500000 yang dikeluarkan pada tahun 1993. Data pasang surut diperoleh dari *Global Tide Model Data*, MIKE DHI dengan resolusi spasial 0,125 *degree* serta resolusi temporal satu jam. Data arus laut Pintasan Lifamatola diperoleh dari Data INSTANT Mooring konsorsium riset multinasional International STRatification AND Transport (INSTANT) tahun 2004. Data dikeluarkan oleh *Marine and Coastal Data Laboratory*, Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan SDM, Kementerian Kelautan dan Perikanan (Pranowo *et al.*, 2005; Gordon *et al.*, 2010).

Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan

persamaan matematis dengan penyelesaian masalah melalui analisis statistik dengan menggunakan tabel, gambar dan diagram (Yusuf, 2014). Model dibangun menggunakan persamaan tiga dimensi tak termampatkan Reynolds rata-rata Navier-Stokes dengan asumsi Boussinesq dan tekanan hidrostatis, *three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure*.

DHI (2013) membangun model dengan persamaan berdasarkan kontinuitas lokal berikut mengikuti formula 1, 2, dan 3.

Formulasi Song dan Haidvogel (1994) melalui diskritisasi vertikal menggunakan formula Sigma Level dengan sistem koordinat S dengan diskritisasi equidistant pertama vertikal ($-1 \leq s \leq 0$) berdasarkan formula 4 dan diskritisasi berdasarkan formula 5 dan 6.



Gambar 1. Lokasi Penelitian. ((A). Lokasi Utama, (B). Selat Capalulu, (C). Selat Mongoli, (D). Selat Lifamatola)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{dwu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial p}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + U_s S \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{dvw}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial p}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \tag{3}$$

Keterangan: u: komponen kecepatan arah sumbu x, v: komponen kecepatan arah sumbu y, w: komponen kecepatan arah sumbu z, t: waktu, η: elevasi permukaan, d : *still water level*, h : *total water level*, F: komponen coriolis, P: densitas air, H: elevasi permukaan , $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, \partial s_{yy}$: komponen *radiation stress tensor*, V_t : viskositas eddy.

$$S_i = -\frac{N_\sigma + 1 - i}{N_\sigma} \text{ dengan } i = 1, (N_\sigma + 1) \tag{4}$$

Diskritisasi sistem koordinat sigma diformulasikan sebagai:

$$\sigma_i = 1 + \sigma_c s_i + (1 - \sigma_c) c(s_i) \text{ dengan } i = 1, (N_\sigma + 1) \tag{5}$$

dengan:

$$c(s) = (1 - b) \frac{\sin(\Theta_s)}{\sin(\Theta)} + b \frac{\tanh(\Theta(s + \frac{1}{2})) - \tanh(\frac{\Theta}{2})}{2 \tanh(\frac{\Theta}{2})} \tag{6}$$

Keterangan: σ_c : faktor pembobot antara distribusi equidistant dan formulasi regang, σ_c berada pada rentang ($0 < \sigma_c \leq 1$), satu menunjukkan distribusi equidistant dan 0 menunjukkan distribusi regangan, Θ : parameter kontrol permukaan ($0 < \theta \leq 20$), b : parameter kontrol dasar ($0 \leq b \leq 1$).

Perlakuan Model

Pembuatan model mengacu terhadap siklus angin tahunan yang terjadi pada wilayah Indonesia dimana penekanan model terjadi pada tiap puncak siklus angin dengan tahun pengamatan 2004. Kondisi ini bertujuan untuk melihat hubungan diantara siklus angin diatas laut dengan pola arus yang dihasilkan pada layer permukaan laut. Pembuatan model dilakukan pada puncak siklus angin meliputi puncak musim barat (Januari), puncak musim peralihan I (April), puncak musim angin timur (Juli) dan puncak musim peralihan II (Oktober) pada tahun 2004.

Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk mengetahui kebenaran data model sehingga model yang telah dibuat mampu menggambarkan kondisi di lapangan. Validasi model dilakukan dengan menggunakan beberapa formulasi statistik untuk mengetahui perbandingan kebenaran model yang

telah dilakukan. Formulasi pertama yang digunakan adalah *Mean Square Error* (MRE). Formulasi ini digunakan untuk mengetahui tingkat akurasi suatu model dengan membandingkan antara selisih data model dengan data lapangan terhadap data lapangan itu sendiri (Wang *et al.*, 2017). MRE dihitung dengan Formula 7 berikut.

$$MRE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_i - O_i}{O_i} \right| \times 100\% \tag{7}$$

keterangan: M_i : Data hasil model ke-i, O_i : Data lapangan ke- i

Formulasi statistik kedua yang digunakan adalah *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE merupakan suatu analisis statistik yang dapat digunakan untuk mengeahui kebenaran suatu data ramalam dimana suatu prediksi dinyatakan mendekati akurat ketika nilai RMSE mendekati nol dengan batas maksimum yang ditolerir hingga

suatu model dapat diterima adalah 0,4. Formulasi ini umumnya digunakan sebagai salah satu alat yang sangat baik dalam menunjukkan tingkat kesalahan dalam pemodelan (Neill dan Hashemi, 2018). Nilai RMSE dihitung menggunakan Formula 8.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (8)$$

keterangan: M : Data hasil model, O : Data lapangan (data *mooring* ekspedisi INSTANT)

Pendekatan statistik lainnya juga dilakukan guna mengetahui kualitas model yang telah dilakukan. Analisis *Mean Absolut Error* (MAE) dilakukan guna melengkapi nilai MRE dan RMSE yang telah diperoleh. MAE merupakan ukuran kesalahan yang digunakan antara pengamatan yang berpasangan dimana kualitas pemodelan yang baik akan menghasilkan MAE pada rentang 0 - 0,5 (Milasari *et al.*, 2021). Formulasi ini digunakan untuk melihat dua fenomena yang sama secara kontinu seperti data lapangan dan pemodelan dengan variabel yang sama (Ismunarti *et al.*, 2020). Tomar dan Kandari (2021) menyatakan formulasi MAE berupa

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (9)$$

keterangan: M_i : Nilai data model ke-i, O_i : Nilai data lapangan ke-i,

Hubungan diantara data observasi dengan data model juga didekati dengan persamaan Pearson untuk mengetahui tingkat hubungan diantara data. Ketika hubungan data kuat maka kenaikan nilai model juga sebanding dengan data observasi (Nettleton, 2014). Hubungan diantara kedua data akan semakin kuat jika nilai korelasi menunjukkan angka satu, nol tidak memiliki korelasi serta minus satu jika berkorelasi negatif. Formulasi Pearson dihitung menggunakan Formula 10.

$$r = \frac{\sum om}{\sqrt{\sum o' \sum m'}} \text{ dengan } o = O - O' \quad (10)$$

dan $m = M - M'$

keterangan : $o = O - O'$, O nilai observasi, O' : rata-rata nilai observasi $m = M - M'$, M : nilai model, M' : rata-rata nilai model

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola arus berdasarkan siklus angin pada sepanjang tahun 2004 digunakan untuk mengetahui interaksi antara angin dan massa air serta karakteristiknya pada wilayah studi. Kondisi ini digunakan untuk menjelaskan apakah terjadi anomali atau kekhasan karakteristik pola arus yang ditimbulkan oleh angin pada sepanjang siklus tersebut. Berdasarkan kondisi tersebut maka siklus angin dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok utama dimana pada setiap kelompok memiliki kondisi puncak dalam suatu siklus tersebut. Pemilihan puncak siklus angin digunakan untuk menyederhanakan fenomena sehingga dinamika perairan yang terjadi pada puncak siklus angin tersebut digunakan sebagai representasi pada kondisi tersebut. Pemodelan berdasarkan siklus angin pada puncak siklus angin meliputi Musim Barat, Peralihan I, Musim Timur, dan Peralihan II dimana pada setiap siklus memiliki puncak yang terjadi pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober (Haryanto *et al.*, 2020). Representasi berdasarkan pergerakan angin ini dimana pada musim barat siklus angin akan bergerak dari Asia menuju Australia serta pada musim timur angin bergerak dari Australia menuju Asia apakah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pola arus yang dihasilkan pada perairan wilayah studi. Pemodelan berdasarkan kondisi tersebut dilakukan agar dapat diidentifikasi apakah angin memberikan pengaruh yang dominan terhadap pola arus yang dihasilkan pada sepanjang tahun 2004. Melalui kondisi tersebut dilakukan pengkajian terhadap pola arus maksimum berupa pola arus yang diperoleh melalui pengambilan tiap nilai tertinggi pada setiap elemen perhitungan. Perlakuan tersebut dilakukan untuk memudahkan penyimpulan pola arus ketika mencapai nilai maksimum selama periode simulasi. Pola maksimum arus pada puncak siklus angin sepanjang tahun 2004 memiliki variasi nilai diantara satu bulan dengan bulan lainnya dimana nilai kecepatan arus saat kondisi maksimum ditampilkan dalam Tabel 1.

Pemodelan menunjukkan bahwa rentang nilai arus maksimum mencapai puncaknya pada bulan Juli 2004 diantara tiga puncak siklus angin lain. Pergerakan pola arus menunjukkan bahwa pada sepanjang puncak siklus angin arah pergerakan arus condong menuju utara dengan mengikuti

bentuk geometri ketika memasuki wilayah kepulauan. Pola arus juga menunjukkan tidak terjadi anomali atau kekhasan pada masing-masing kategori puncak siklus angin sehingga dapat disimpulkan pada tahun 2004 pola angin tidak mempengaruhi pergerakan arus secara signifikan. Visualisasi pada gambar 2, 3, 4, dan 5 menunjukkan bahwa pada resolusi grid horizontal yang tinggi terjadi penumpukan vektor arus dibandingkan wilayah lain seperti yang terjadi pada Selat Capalulu, Selat Mongoli, dan Selat Lifamatola. Keadaan tersebut menyebabkan seolah – olah arus bergerak hingga daratan dimana vektor arus bersinggungan atau memotong daratan. Arah pergerakan arus melalui vektor kemudian divisualisasikan pada gambar yang lebih besar sehingga pola arus yang terjadi dapat dipahami dengan baik. Pola pergerakan arus pada puncak siklus angin sepanjang tahun 2004 ditampilkan pada Gambar 2, 3, 4, dan 5

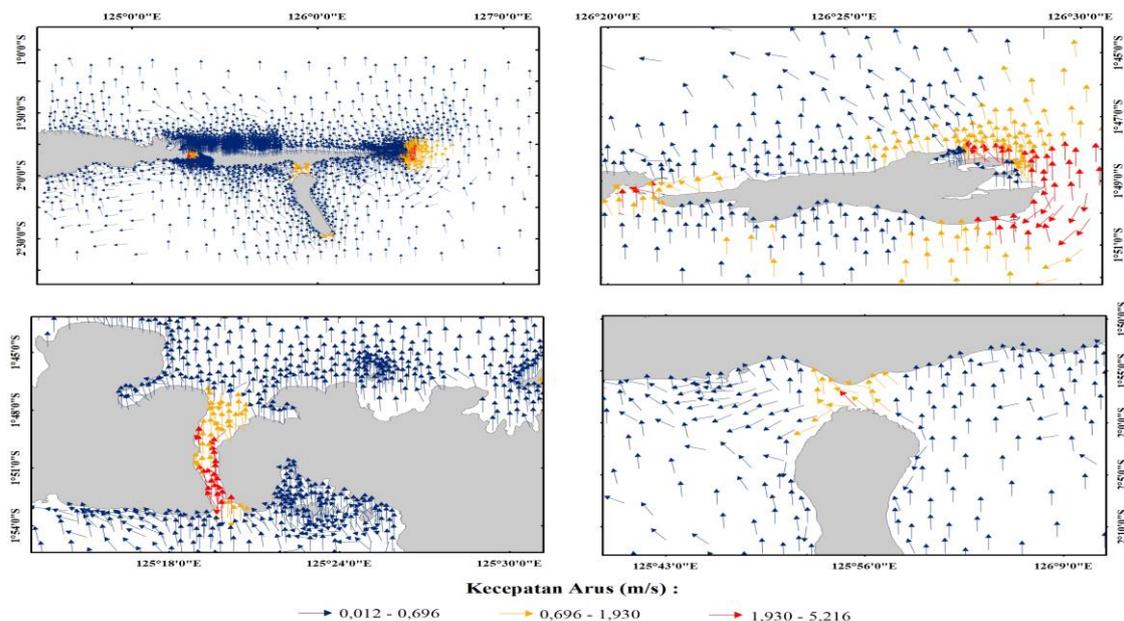
Pola Arus Rerata Pada Puncak Siklus Angin Tahun 2004 (Januari, April, Juli, dan Oktober)

Pola arus rerata juga dilakukan dengan metode yang sama namun dilakukan perataan pada setiap nilai variabel pada elemen melalui resultan vektor sehingga diperoleh kecepatan dan arah arus pada setiap bulan puncak siklus angin untuk memudahkan penggambaran pola arus akibat domain model yang sangat besar. Proses ini berdampak terhadap nilai arus yang dihasilkan sehingga menyebabkan rentang nilai jauh lebih kecil dibandingkan nilai maksimum. Variasi kecepatan arus rerata pada saat puncak siklus angin tahun 2004 ditampilkan dalam Tabel 2.

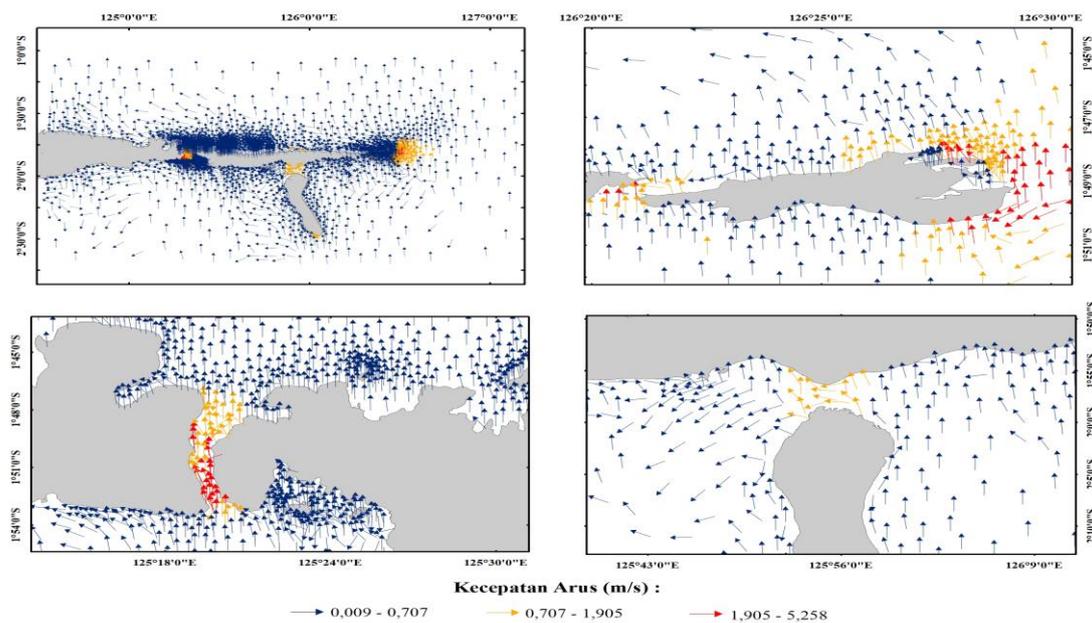
Pola pergerakan arus ketika kondisi rerata menunjukkan bahwa pergerakan arus condong ke arah barat dengan pergerakan menuju selatan. Karakteristik pola arus saat kondisi rerata memiliki kesamaan dengan bulan – bulan lainnya dimana tidak terjadi kekhasan pola diantara satu puncak musim dibandingkan puncak musim lainnya. Vektor - vektor arus juga mengalami penumpukan pada bagian kepulauan dan pulau-pulau kecil yang memiliki resolusi horizontal yang lebih tinggi.

Tabel 1. Kecepatan Arus Pada Kondisi Maksimum Saat Puncak Siklus Angin Tahun 2004

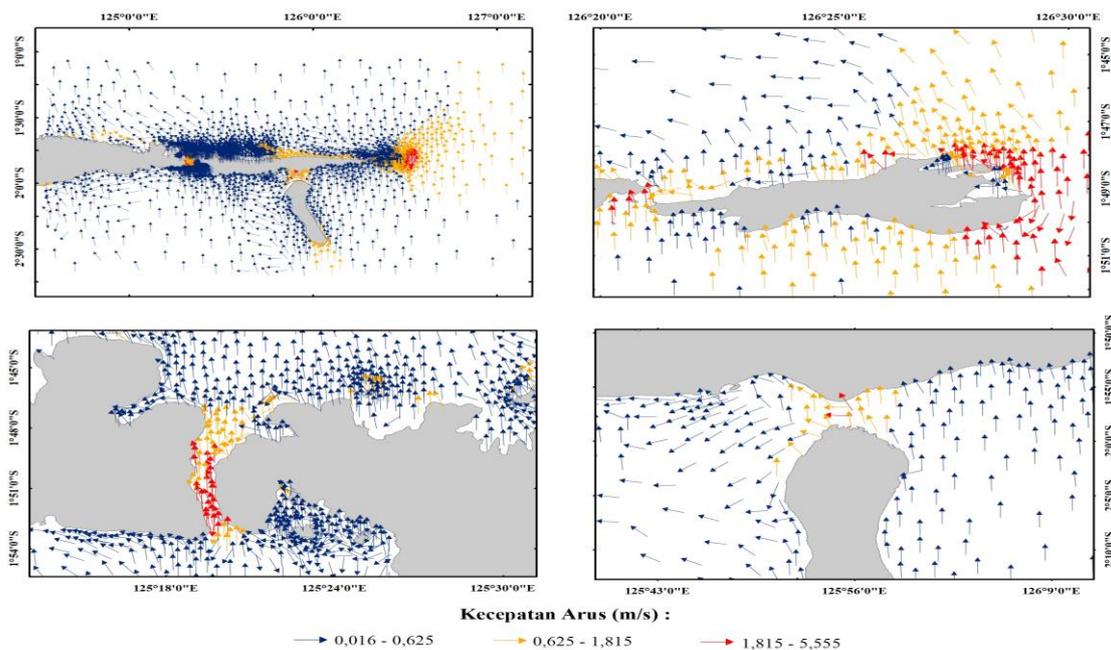
Musim Angin	Puncak Musim	Rentang Kecepatan Arus Maksimum	Nilai Rerata Kecepatan Arus Maksimum
Barat	Januari	0,0123 – 5,216 m/s	0,379 m/s
Peralihan I	April	0,009 – 5,258 m/s	0,374 m/s
Timur	Juli	0,016 – 5,55 m/s	0,547 m/s
Peralihan II	Oktober	0,09 m/s – 5,204 m/s	0,371 m/s



Gambar 2. Pola Arus Maksimum Bulan Januari 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 3. Pola Arus Maksimum Bulan April 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 4. Pola Arus Maksimum Bulan Juli 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)

Tabel 2. Kecepatan Arus Pada Kondisi Rerata Saat Puncak Siklus Angin Tahun 2004

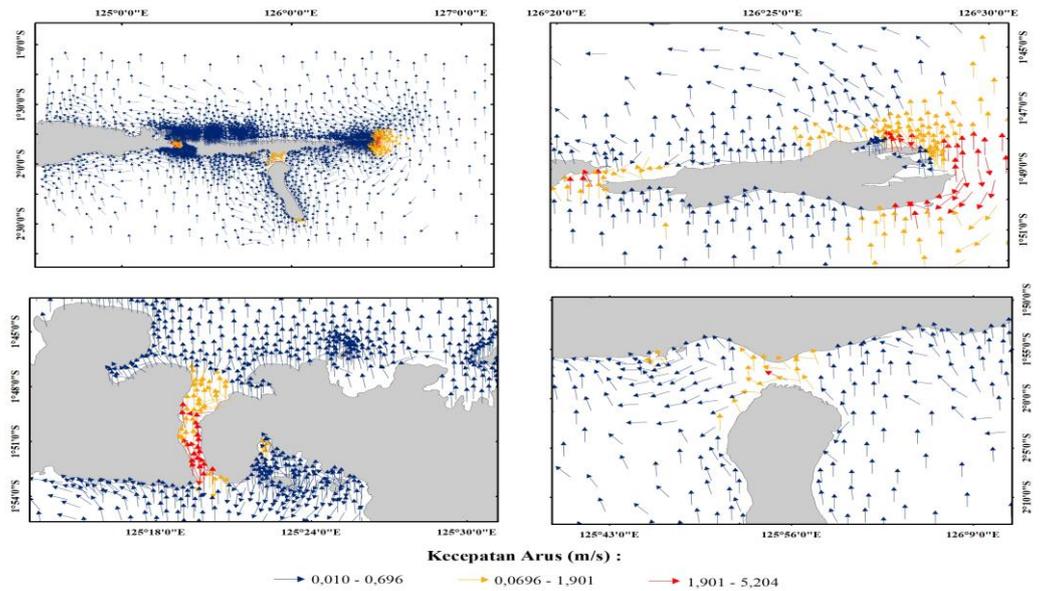
Musim Angin	Puncak Musim	Rentang Kecepatan Arus Rerata	Nilai Rerata Kecepatan Arus Rerata
Barat	Januari	0,003 - 2,291 m/s	0,145 m/s.
Peralihan I	April	0,003 - 2,344 m/s	0,149 m/s
Timur	Juli	0,005 - 2,364 m/s	0,212 m/s
Peralihan II	Oktober	0,002 - 2,373 m/s	0,149 m/s

Pada rerata arus saat puncak siklus angin terlihat bahwa pada bagian selatan Selat Capalulu terjadi arus pusaran (eddy) dengan pergerakan berlawanan arah jarum jam. Pola pergerakan arus rerata pada saat puncak siklus angin ditampilkan dalam Gambar 6, 7, 8, dan 9.

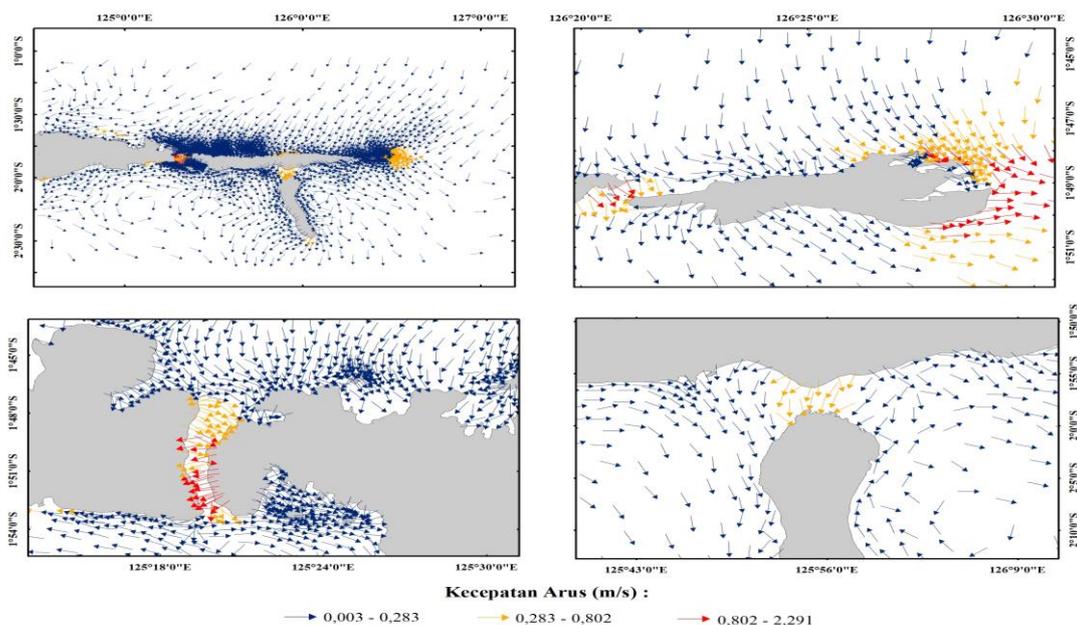
Komponen Amplitudo Pasang Surut Pada Puncak Siklus Angin Tahun

Simulasi model ini juga menghasilkan variabel pasang surut kemudian dilakukan

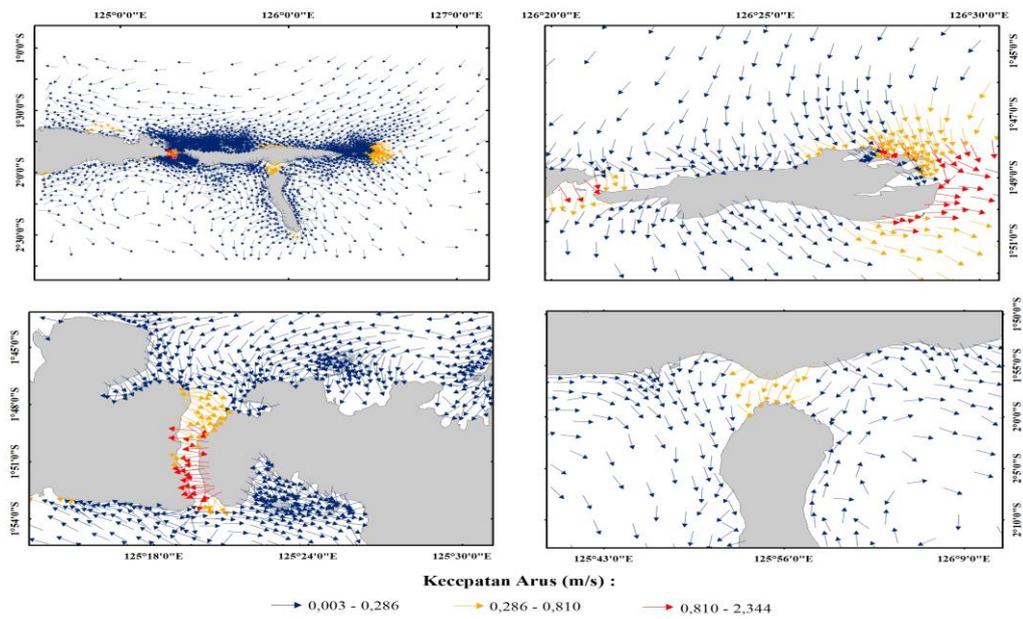
identifikasi lebih jauh mengenai karakteristik pasang surut yang dihasilkan oleh model. Pasang surut didekati dengan komponen amplitudo melalui Admiralty pada wilayah laut bebas untuk menentukan karakteristik pasang surut pada wilayah perairan tersebut. Penggunaan tiga titik disebelah utara kepulauan dan tiga titik disebelah selatan diharapkan mampu mewakili karakteristik pasang surut perairan. Titik-titik pasang surut disajikan dalam Gambar 10.



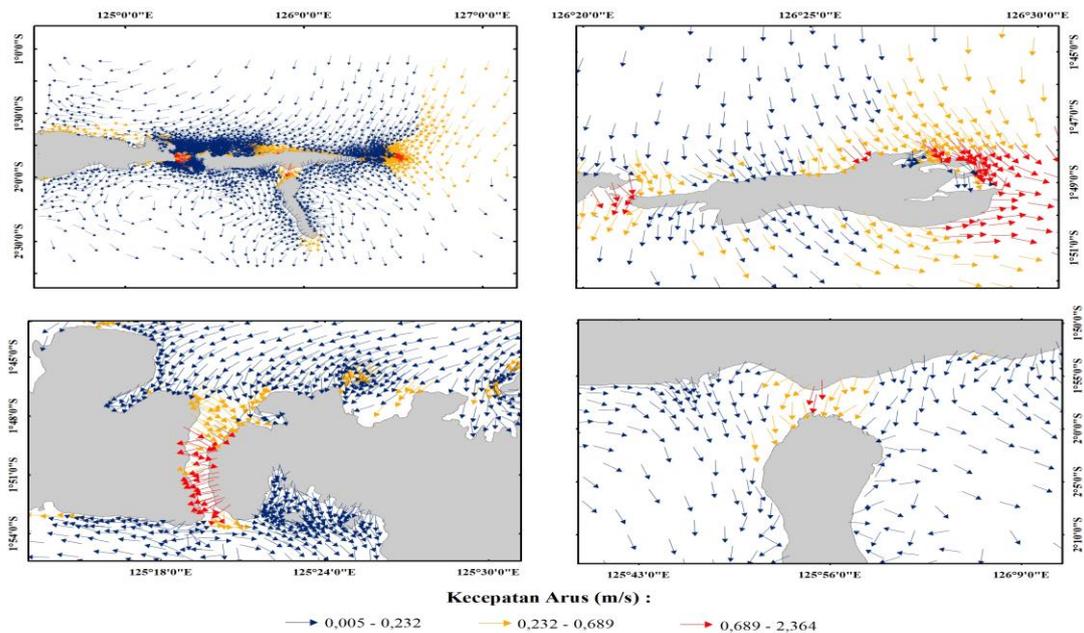
Gambar 5. Pola Arus Maksimum Bulan Oktober 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 6. Pola Arus Rata-Rata Bulan Januari 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 7. Pola Arus Rata-Rata Bulan April 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 8. Pola Arus Rata-Rata Bulan Juli 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)

Berdasarkan ekstraksi dan pengolahan data diperoleh bahwa pada kedua sisi perairan, pasang surut memiliki karakteristik yang sama dengan sifat campuran condong menuju harian ganda dengan rentang formzahl 0,25 – 1,5. Variasi komponen amplitudo dominan memiliki perbedaan diantara kedua sisi perairan dimana pada sisi utara pulau komponen K1 lebih mendominasi namun pada sisi selatan komponen M2 lebih mendominasi

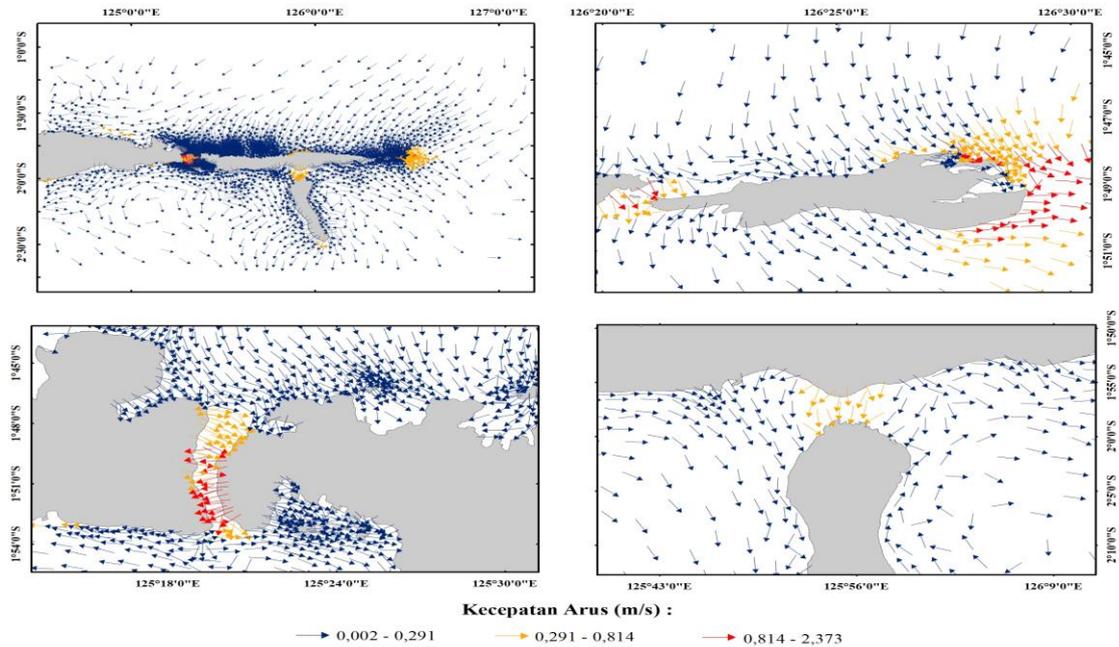
dibandingkan K1. Karakteristik komponen amplitudo pada setiap titik disajikan pada Tabel 3.

Elevasi Bulanan Pasang Surut Pada Puncak Siklus Angin Tahun 2004

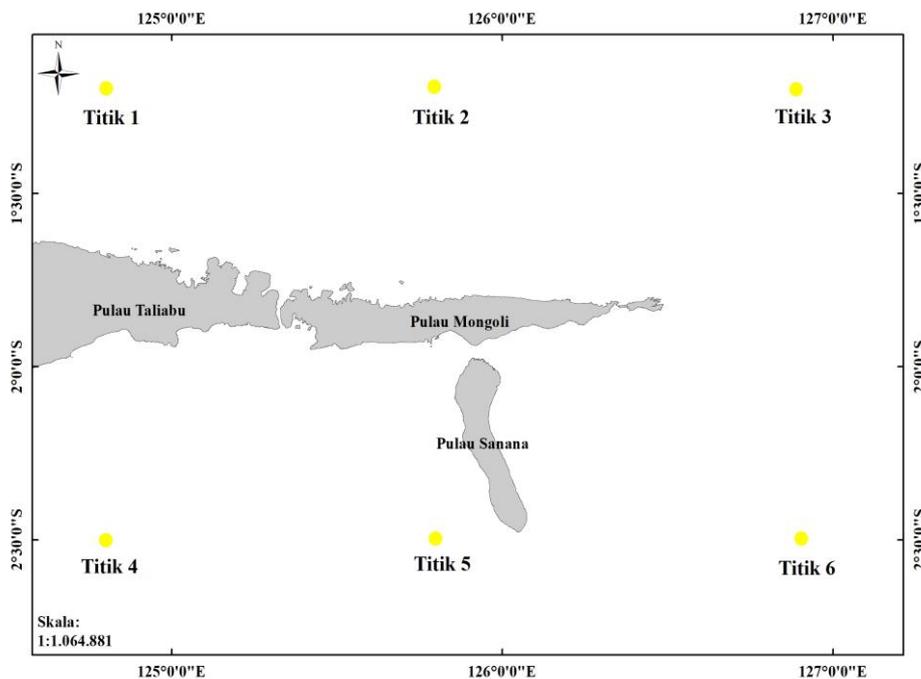
Elevasi bulanan pasang surut pada sepanjang puncak siklus angin memiliki variasi yang berbeda dengan beberapa variabel memiliki nilai yang hampir sama. Nilai MSL pada berbagai

titik memiliki variasi yang berada pada rentang 2 - 5 cm dengan nilai Modus MSL 3 cm. Nilai HHWL dan LLWL juga memiliki variasi pada berbagai titik. Perbedaan nilai diantara kedua variabel dengan selang yang besar terjadi pada titik 4

dengan HHWL tertinggi terjadi pada bulan Juli 2004 dengan nilai 128 cm sedangkan nilai terendah juga terjadi pada bulan yang sama dengan nilai - 124 cm. Ringkasan elevasi bulanan pada puncak siklus angin disajikan dalam Tabel 4.



Gambar 9. Pola Arus Rata-Rata Bulan Oktober 2004 Pada Layer Permukaan (Layer 10)



Gambar 10. Titik Titik Pasang Surut

Tabel 3. Komponen Amplitudo Pasang Surut Pada Sepanjang Puncak Siklus Angin Tahun 2004

Waktu	Titik	Komponen Amplitudo Pasang Surut (cm)										Formzahl
		S0	M2	S2	N2	K1	O1	M4	MS4	K2	P1	
Januari	1	3	20	17	2	19	14	0	0	5	6	0.89
	2	3	18	16	2	19	14	0	0	4	6	0.97
	3	4	14	14	2	20	14	0	0	4	6	1.18
	4	3	47	16	10	20	19	0	0	4	9	0.73
	5	5	43	15	10	26	18	0	0	4	9	0.76
	6	3	29	14	7	23	16	0	0	4	8	0.9
April	1	3	19	19	3	19	13	0	0	5	6	0.86
	2	3	17	18	2	19	14	0	0	5	6	0.95
	3	4	14	15	2	20	14	0	0	4	7	1.15
	4	3	46	18	9	27	19	0	0	5	9	0.72
	5	5	42	17	9	26	18	0	0	5	9	0.75
	6	3	29	14	7	23	16	0	0	4	8	0.9
Juli	1	2	19	21	2	19	13	0	0	6	6	0.81
	2	3	17	19	2	19	1	0	0	5	6	0.88
	3	3	14	17	2	19	14	0	0	5	6	1.07
	4	2	46	20	9	28	18	0	0	5	9	0.7
	5	4	43	18	8	26	17	0	0	5	9	0.72
	6	2	29	15	6	23	15	0	0	4	7	0.86
Oktober	1	2	20	18	2	19	13	0	0	5	6	0.84
	2	2	18	17	2	19	13	0	0	5	6	0.93
	3	3	14	15	3	20	13	0	0	4	6	1.13
	4	2	47	17	12	27	18	0	0	5	9	0.69
	5	4	43	16	11	25	17	0	0	4	8	0.72
	6	2	29	13	8	22	15	0	0	4	7	0.87

Validasi Model

Validasi model terhadap arus laut dilakukan dengan membandingkan data model dengan data Ekspedisi INSTANT yang dilakukan pada bulan Maret 2004 untuk mendapatkan tingkat akurasi peramalan model. Validasi dilakukan pada kedalaman -1000 meter untuk mengetahui bagaimana hubungan diantara kecepatan arus dan kecepatan model pada kedalaman tersebut. Hasil menunjukkan bahwa ramalan model hidrodinamika 3D dengan menggunakan berbagai parameter statistik memiliki kualitas yang berbeda diantara satu variabel dengan variabel lainnya. Namun jika merujuk terhadap hubungan grafik, nilai statistik, serta, hubungan antar data maka validasi model yang dihasilkan memiliki nilai peramalan yang rendah dimana kesalahan peramalan relatif bernilai 59,05 % terhadap kecepatan arus total, 73,58% terhadap vektor U dan 62,87% terhadap vektor V

hal ini berbanding lurus dengan korelasi antar data yang dihasilkan terutama terhadap komponen kecepatan arus total, dan komponen vektor U. Berikut adalah nilai validasi model dengan berbagai parameter statistik pada Tabel 5.

Perbedaan sifat peramalan dalam berbagai variabel statistik tersebut kemudian didekati dengan menggunakan visualisasi grafik untuk melihat bagaimana kualitas model yang dihasilkan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui parameter statistik mana yang memiliki akurasi yang lebih baik dalam merepresentasikan model ini. Berikut adalah grafik validasi model terhadap data mooring pada Gambar 10.

Berdasarkan gambaran diatas dapat disimpulkan bahwa parameter statistik MRE memiliki akurasi yang lebih baik dalam merepresentasikan kesalahan relatif model jika merujuk terhadap hubungan garis - garis grafik

diantara data model dan data lapangan dibandingkan parameter statistik lainnya. Nilai kesalahan model yang cukup besar berdasarkan MRE mampu divisualisasikan dengan grafik yang tidak berimpit sempurna seperti pada gambar 10 diatas. Rendahnya akurasi model yang dihasilkan disebabkan oleh berbagai faktor seperti pembangunan model secara barotropik hingga berbagai faktor lain yang mempengaruhi arus laut dalam diabaikan. Nilai kedalaman validasi yang berada pada titik 1000 meter serta berlokasi pada Pintasan Lifamatola tersebut memiliki berbagai faktor pembangkit hingga kondisi kolom perairan yang dapat mempengaruhi nilai dan sirkulasi arus. Faktor berupa ARLINDO, variasi salinitas dan temperatur, serta pintasan yang dilalui *great*

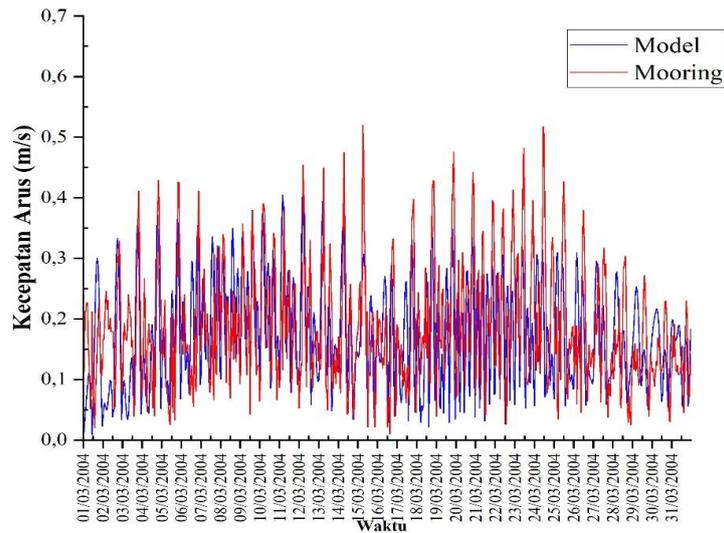
conveyor belt tidak terakumulasi didalam model sehingga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai korelasi dan akurasi yang dihasilkan. Jika merujuk terhadap komponen vektor arus, maka komponen U model memiliki nilai yang sangat rendah jika dibandingkan dengan komponen V. Kondisi ini secara total akan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap kesalahan peramalan relatif yang dihasilkan. Nilai kuantitatif model yang bersifat lebih rendah mengakibatkan hubungan data yang dihasilkan berada pada rentang sifat kurang hingga cukup secara korelasi akibat kecepatan arus dari model tidak mampu mendekati nilai yang dihasilkan oleh perekaman mooring.

Tabel 4. Elevasi Bulanan Pada Pada Puncak Siklus Angin Tahun 2004 (Januari, April, Juli, dan Oktober)

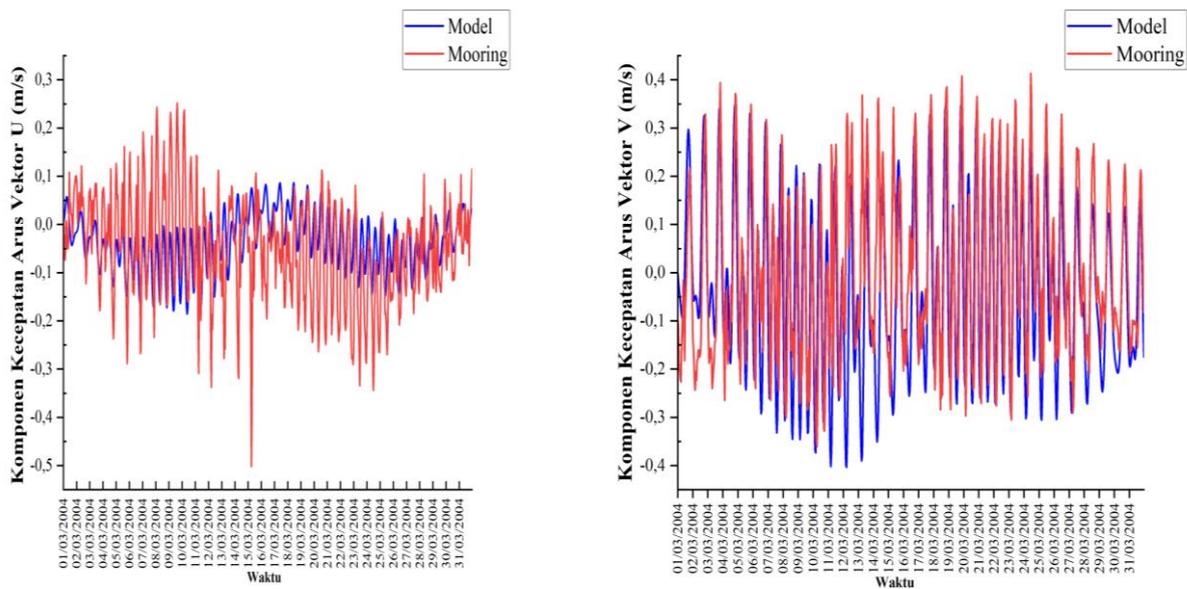
Elevasi Bulanan (cm) Pada Puncak Siklus Angin Sepanjang Tahun 2004							
Waktu	Titik	MSL	HHWL	MHWL	MLWL	LLWL	LAT
Januari	1	3	83	55	-49	-77	-80
	2	3	80	54	-47	-73	-76
	3	4	76	52	-44	-68	-71
	4	3	126	97	-90	-120	-130
	5	5	120	92	-83	-111	-121
	6	3	95	72	-65	-89	-96
April	1	3	85	41	-49	-79	-82
	2	3	82	53	-47	-75	-78
	3	4	77	51	-44	-70	-73
	4	3	127	95	-89	-121	-130
	5	5	121	91	-82	-112	-122
	6	3	96	71	-64	-89	-96
Juli	1	2	86	53	-49	-82	-84
	2	3	83	52	-47	-78	-80
	3	3	78	50	-44	-72	-74
	4	2	128	94	-90	-124	-133
	5	4	122	90	-83	-115	-123
	6	2	96	70	-65	-92	-98
Oktober	1	2	83	53	-49	-79	-81
	2	2	80	52	-48	-75	-77
	3	3	75	50	-45	-70	-72
	4	2	124	93	-89	-120	-132
	5	4	118	89	-82	-111	-122
	6	2	92	69	-64	-88	-96

Tabel 5. Nilai Validasi Model Arus dengan Parameter Statistik

Variabel Statistik	Kecepatan Arus Total	Vektor Arus U	Vektor Arus V
MRE	59,05 %	73,58 %	62,87 %
RMSE	0,097	0,10	0,14
MAE	0,078	0,081	0,106
PEARSON	0,447	0,289	0,667



Gambar 11. Grafik Validasi Kecepatan Arus Model dengan Kecepatan Arus yang Direkam Mooring INSTANT Maret 2004



Gambar 12. Grafik Validasi Kecepatan Vektor Arus U (Kiri) dan Vektor Arus V (Kanan) Pada Kedalaman 1000 meter Model dan Mooring INSTANT 2004

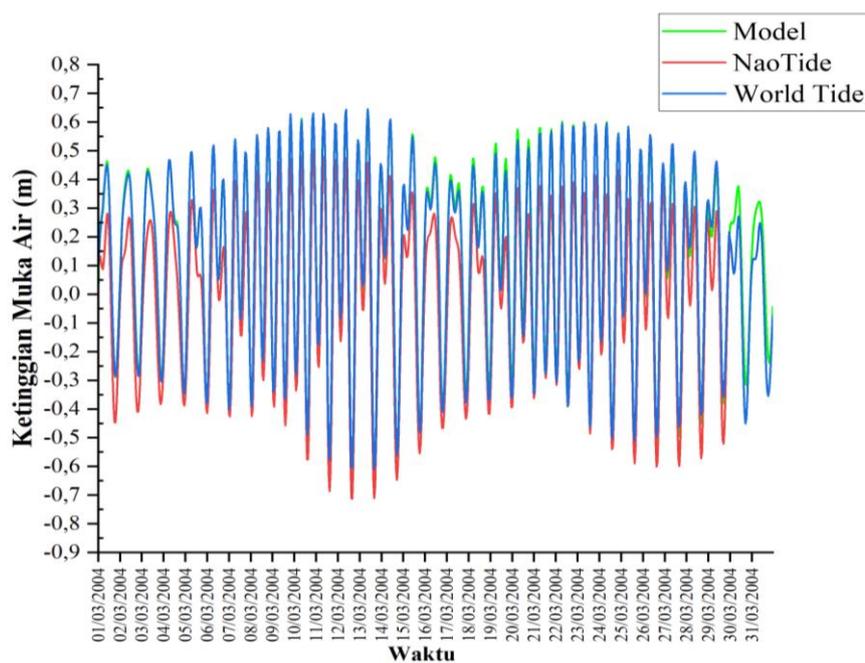
Validasi juga dilakukan terhadap aspek pasang surut sehingga dapat diketahui kualitas model yang dihasilkan secara horizontal akibat kondisi model secara vertikal tidak mampu didekati dengan baik akibat kompleksnya dinamika perairan pada wilayah ini. Validasi pasang surut dilakukan dengan menggunakan data model lain yang diakibatkan tidak adanya rekaman data pada wilayah ini sehingga dengan melakukan perbandingan nilai pasang surut melalui model lain dapat diketahui akurasi model yang dihasilkan. Berdasarkan kondisi tersebut, model pasang surut yang dihasilkan memiliki kesalahan relatif yang sangat rendah dengan korelasi data hingga 0,99 (sangat tinggi). Berdasarkan kondisi tersebut dapat

disimpulkan bahwa secara barotropik model yang dihasilkan memiliki kualitas yang tinggi namun apabila dilakukan validasi profil vertikal maka kualitas model akan menurun secara drastis akibat kurangnya data pendukung yang dapat diakses dan kompleksnya dinamika kolom perairan. Validasi model terhadap pasang surut dengan berbagai parameter statistik disajikan dalam Tabel 6.

Berdasarkan berbagai parameter statistik diatas dapat disimpulkan bahwa pada keseluruhan variabel model memiliki kesalahan relatif yang sangat rendah dengan akurasi yang sangat tinggi. Kondisi ini diperkuat dengan berimpitnya berbagai grafik validasi seperti yang ditunjukkan Gambar 13.

Tabel 6. Nilai Validasi Model Pasang Surut dengan Parameter Statistik

Variabel Statistik	Pasang Surut
MRE (World Tide)	2,02 %
MRE (Nao Tide)	13,26 %
RMSE (World Tide)	0,0346
RMSE (Nao Tide)	0,141
MAE (World Tide)	0,020
MAE (Nao Tide)	0,127
PEARSON (World Tide)	0,99
PEARSON (Nao Tide)	0,980



Gambar 13. Grafik Ketinggian Pasang Surut Pada Perairan Sanana (Stasiun Sanana) Maret 2004

Pola arus berdasarkan penyajian data maksimum dan rerata memiliki dua sifat dimana pada keadaan maksimum arus cenderung bergerak menuju utara sedangkan pada kondisi rerata pergerakan arus condong menuju barat dengan pergerakan menuju selatan. Variasi dua nilai ini disebabkan karena pembangkitan arus pada wilayah domain memiliki dominansi yang sangat dipengaruhi pasang surut, dimana pada laut bebas pembangkitan oleh pasang surut memiliki persentase 96-98 % sehingga pola arus dipengaruhi oleh perbedaan muka air diantara bagian utara dan selatan domain. Selain itu kondisi perairan yang juga berlokasi pada daerah pesisir, walaupun memiliki laut dalam, menyebabkan dominansi arus terbagkit dipengaruhi oleh pasang surut sebagai faktor dominan. Pola kecepatan arus memiliki variasi dimana pada laut dalam kecepatan arus sangat kecil namun ketika memasuki selat dan wilayah perairan yang lebih dekat dengan garis pantai kecepatan arus bertambah besar. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan nilai kedalaman untuk mempertahankan volume flux air yang mengalami perpindahan. Selain itu kemiringan dasar laut yang terjal menyebabkan pengurangan kecepatan menjadi jauh lebih cepat diantara perairan dangkal dan dalam (Utami dan Guruh, 2010). Pada wilayah selat percepatan arus dapat lebih jelas teramati oleh pendangkalan perairan yang disertai dengan celah sempit yang memisahkan dua daratan. Kondisi tersebut menyebabkan massa air yang melewati selat harus mempertahankan volume flux air sehingga kecepatan arus harus dipercepat untuk mempertahankan kestabilan. Pemodelan menunjukkan bahwa pada Selat Capalulu terjadi kecepatan arus yang sangat besar yang disebabkan oleh efek perubahan penampang dan *bottleneck* yang menghubungkan dua laut dalam dari kedua sisi. Kondisi tersebut juga menyebabkan pada dua selat lainnya kecepatan arus memiliki nilai yang tinggi dibandingkan wilayah perairan lain. Selain itu kecepatan arus juga memiliki nilai yang cukup besar pada wilayah sisi timur Pulau Lifamatola dengan kecepatan hingga 3.7 m/s (Kasman *et al.*, 2019).

Pola arus pada sepanjang garis pantai memiliki karakteristik yang hampir sama namun pengaruh geometri pulau-pulau memberikan pengaruh terhadap pembelokan arus sehingga pergerakan arus bergerak menyusuri pantai. Materi fluida yang bersifat dinamis tentunya akan memberikan pengaruh terhadap penyesuaian

bentuk geometri tersebut (Hardhiyanti *et al.*, 2018). Kondisi model yang bersifat barotropik menyebabkan arah pergerakan arus pada layer-layer kedalaman, dibawah layer permukaan atau layer 10, memiliki arah pergerakan yang hampir sama dengan perbedaan signifikan ditemukan pada faktor kecepatan arus. Semakin menuju layer dasar, layer 1, kecepatan arus akan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan layer permukaan. Kondisi ini disebabkan karena pergesekan antara air dengan dasar perairan akan menyebabkan transformasi energi menjadi gesekan yang menyebabkan energi kinetik arus berkurang. Kondisi tersebut juga mempengaruhi layer di atasnya sehingga pengurangan kecepatan akibat penambahan kedalaman terjadi walaupun model bersifat barotropik. Selain itu faktor pembangkitan arus yang juga dibangkitkan oleh pasang surut menyebabkan energi yang berasal dari pasang surut mengalami disipasi dari permukaan hingga kolom perairan yang dapat menyebabkan terbentuknya pasang surut internal di dalam kolom perairan (Ray dan Egbert, 1997; Egbert dan Ray, 2001).

Karakteristik Pasang Surut

Karakteristik pasang surut pada domain menunjukkan bahwa pola pasang surut bersifat campuran condong harian ganda dengan rentang nilai pada puncak siklus angin sepanjang tahun 2004 berada pada rentang Formzahl 0,69 – 1,18. Keadaan tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Respati dan Windupranata, 2016; Kasman *et al.*, 2019) yang menyatakan bahwa karakteristik pasang surut pada wilayah selatan Halmahera bersifat condong harian ganda. Namun dengan karakter yang sama terdapat perbedaan faktor dominansi komponen amplitudo pasang surut terbesar pada sisi utara dan sisi selatan domain. Perhitungan model dan admiralty menunjukkan bahwa pada sisi selatan komponen pasang surut terbesar didominasi oleh komponen M2 yang merupakan bagian dari penjalaran gelombang pasang surut yang berasal dari Samudera Hindia. Namun pada sisi utara komponen dominan dipengaruhi oleh komponen K1 yang merupakan propagasi gelombang pasang surut yang berasal dari Samudera Pasifik. Kondisi ini menyebabkan wilayah perairan Kepulauan Sula dan Kepulauan Taliabu memiliki dua konstituen dominan yang berbeda. Namun konstituen M2 memiliki pengaruh yang lebih besar dengan perbedaan nilai dengan konstituen K1 relatif kecil. Perbedaan nilai yang tidak signifikan tersebut

menyebabkan pasang surut pada wilayah ini sepenuhnya berkarakteristik cenderung harian ganda (Ray *et al.*, 2005).

Ketinggian muka air dengan menggunakan beberapa parameter seperti HHWL dan MHWL menunjukkan bahwa sisi selatan kepulauan memiliki ketinggian air yang lebih besar dibandingkan bagian utara kepulauan dengan perbedaan nilai yang tidak terlalu besar. Kondisi yang sama juga terjadi terhadap parameter MLWL, LLWL, dan LAT dimana pada sisi selatan nilai muka air pada saat mencapai posisi rendah bernilai lebih kecil dibandingkan dengan elevasi muka air pada bagian utara saat mencapai kondisi yang sama. Keadaan tersebut ditemukan pada berbagai titik disepanjang puncak siklus angin tahun 2004. Kondisi tersebut diduga terpengaruh akibat faktor pembangkit serta konstituen dominan yang berasal dari propagasi Samudera Hindia sehingga memberikan implikasi terhadap berbagai faktor termasuk elevasi muka air.

KESIMPULAN

Karakteristik perairan Kepulauan Sula dan Taliabu berdasarkan pemodelan Hidrodinamika 3D menunjukkan bahwa karakteristik pasang surut bersifat campuran condong harian ganda dengan konstituen dominan pada utara kepulauan didominasi konstituen K1. Pada sisi selatan kepulauan konstituen pasang surut didominasi oleh konstituen M2 yang berasal dari propagasi pasang surut Samudera Hindia. Pola arus yang dihasilkan pada sepanjang puncak siklus angin bersifat dominan dua arah dimana pada keadaan maksimum arus cenderung bergerak menuju utara sedangkan pada kondisi rerata pergerakan arus condong menuju barat dengan pergerakan menuju selatan. Nilai kecepatan arus memiliki variasi pada berbagai tempat dimana pada wilayah perairan laut dalam arus bergerak cenderung lebih lambat. Sedangkan kecepatan terbesar cenderung terjadi pada selat-selat diantara kepulauan. Kecepatan arus terbesar ditemukan pada Selat Capalulu dan sisi timur Pulau Lifamatola dengan kecepatan terbesar pada domain 5,555 m/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Seluruh penulis adalah kontributor utama pada studi dan artikel ini. Penelitian dilaksanakan di laboratorium komputasi dan pengolahan data Hidro-Oseanografi Prodi Hidrografi Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL) di Jakarta Utara. Proses validasi simulasi dilakukan di

Marine and Coastal Data Laboratory, Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan SDM, Kementerian Kelautan dan Perikanan RI.

DAFTAR PUSTAKA

- DHI. 2013. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic and Transport Module*. 14.
- Egbert, G.D. & Ray, R.D. 2001. Estimates of M2 Tidal Energy Dissipation from TOPEX/Poseidon Altimeter Data. *Journal of Geophysical Research*, 106:475–502.
- Firdaus, R., Manik, H.M., Atmadipoera, A.S., Zuraida, R. & Purwanto, C. 2021. Pencitraan Struktur Halus Termohalin Menggunakan Seismik Refleksi Multikanal di Utara Laut Maluku. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12:151–162.
- Gordon, A.L., Sprintall, J., Van Aken, H.M., Susanto, R.D., Wijffels, S., Molcard, R., Ffield, A., Pranowo, W. & Wirasantosa, S. 2010. The Indonesian throughflow during 2004-2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2):115–128. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2009.12.002
- Hardhiyanti, W.F., Kurniadi, Y.N., Mustikasari, E., & Noviadi, Y. 2018. Pola Hidrodinamika di Perairan Nunukan sebagai Usulan pada Permasalahan Abrasi Pulau-pulau Kecil. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 4(2):58-69. doi: 10.26760/rekaracana.v4i2.58
- Haryanto, Y.D., Agdialta, R. & Hartoko, A. 2020. Analisis Monsun Di Laut Jawa. *Berkala Perikanan Terubuk*, 48(2):492–500.
- Hasanudin, M. 1998. Arus Lintas Indonesia (ARLINDO). *Oseana*, XXIII(2):1–9.
- Ismunarti, D.H., Zainuri, M., Sugianto, D.N. & Saputra, S.W. 2020. Pengujian Reliabilitas Instrumen Terhadap Variabel Kontinu Untuk Pengukuran Konsentrasi Klorofil- A Perairan. *Buletin Oseanografi Marina*, 9(1): 1–8. doi: 10.14710/buloma.v9i1.23924
- Kasman, Ihsan, E.N., Suardana, I.N., Purwanto, Turuy, S., Supyan, Dumba, R., Sapsuha, S. & Masuku. 2019. Rencana Pengelolaan dan Zonasi Taman Pesisir Kepulauan Sula Provinsi Maluku Utara Tahun 2020- 2040. Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Maluku Utara. Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Maluku Utara.
- Milasari, A., Ismunarti, D.H., Indrayanti, E.,

- Muldiyatno, F., Ismanto, A. & Rifai, A. 2021. Model Arus Permukaan Teluk Lampung pada Musim Peralihan II dengan Pendekatan Hidrodinamika. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3): 259–268. doi; 10.14710/buloma.v10i3.38293
- Neill, S.P. & Hashemi, M.R. 2018. Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea. In *Fundamentals of Ocean Renewable Energy: Generating Electricity from the Sea*. doi: 10.1016/C2016-0-00230-9
- Nettleton, D. 2014. Commercial Data Mining: Processing, Analysis and Modeling for Predictive Analytics Projects. Commercial Data Mining: Processing, Analysis and Modeling for Predictive Analytics Projects. doi: 10.1016/C2013-0-00263-0
- Permana, A.D., Sugiyono, A. & Boedoyo, M.S. 2012. Perencanaan Energi Daerah Provinsi Maluku Utara. *Jurnal Ekonomi dan Studi Pembangunan*, 4(2):261-272
- Pranowo, W.S., Kuswardhani, A.R.T.D., Kepel, T. L., Kadarwati, U.R., Makarim, S. & Husrin, S. 2005. Menguak Arus Lintas Indonesia. Pusat Riset Wilayah Laut & Sumberdaya Non-Hayati, Badan Riset Kelautan dan Perikanan, Departemen Kelautan dan Perikanan.
- Ray, R.D., Egbert, G.D. & Erofeeva, S.Y. 2005. A brief overview of tides in the Indonesian seas. *Oceanography*, 18(4): 74–79. doi: 10.5670/oceanog.2005.07
- Respati, M.R. & Windupranata, W. 2016. Pemetaan Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut di Selat Capalulu, Kepulauan Sula, Maluku Utara. *ITB Indonesian Journal of Geospatial*, 05(1):27–39.
- Sinha, M., Yadav, R.K. & Chakraborty, P. 2016. Island Modeling Using Unstructured Grid during a Tropical Storm. *International Journal of Oceanography*, p.1–8. doi: 10.1155/2016/5834572
- Sjöberg, B. & Stigebrandt, A. 1992. Computations Of The Geographical Distribution Of The Energy Flux To Mixing Processes Via Internal Tides And The Associated Vertical Circulation In The Ocean. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 39(2): 269–291. doi: 10.1016/0198-0149(92)90109-7
- Song, Y. & Haidvogel, D. 1994. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. In *Journal of Computational Physics* 115(1): 228–244. doi : 10.1006/jcph.1994.1189
- Tomar, A., & Kandari, R. 2021. Advances in Smart Grid Power System: Network, Control and Security. Academic Press, 2020. doi: 10.1016/c2019-0-02774-4
- Utami, W.T. & P Guruh, D. 2010. Pengaruh Topografi Dasar Laut Terhadap Gerakan Arus Laut. *Geoid*, 5(1):059–065. doi: 10.12962/j24423998.v5i1.7332
- Wang, C., Chen, S., Li, D., Wang, D., Liu, W., & Ji, Y. 2017. A Landsat-based model for retrieving total suspended solids concentration of estuaries and coasts. *Geoscientific Model Development*, 10(12):4347-4365. doi: 10.5194/gmd-2016-297
- 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(2):517–531. doi: 10.5194/os-12-517-2016
- Yusuf, M. 2014. Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif & Penelitian Gabungan. PT Fajar Interpratama Mandiri.
- Zamani, B. & Koch, M. 2020. Comparison between two hydrodynamic models in simulating physical processes of a reservoir with complex morphology: Maroon reservoir. *Water (Switzerland)*, 12(3):1–24. doi: 10.3390/w12030814