

## PENCARIAN LOKASI YANG TEPAT UNTUK PEMASANGAN TURBIN ARUS LAUT PENGHASIL DAYA LISTRIK

### IDENTIFICATION OF SUITABLE SITES FOR MARINE CURRENT TURBINE INSTALLATION FOR POWER GENERATION

Nayla Cahya Nabillah<sup>1</sup>, I Wayan Sumardana Eka Putra<sup>2</sup>, Tri Nur Cahyo<sup>1</sup>, Dian Adrianto<sup>3</sup>,  
Agus Iwan Santoso<sup>3</sup>, dan Novi Susetyo Adi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Banyumas, Indonesia

<sup>2</sup>Prodi Hidro-Oseanografi, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), DKI Jakarta, Indonesia

<sup>3</sup>Prodi Oseanografi, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), DKI Jakarta, Indonesia,

e-mail : sumardanal24@gmail.com

Diterima tanggal: 26 Mei 2025 ; diterima setelah perbaikan: 3 September 2025 ; Disetujui tanggal: 22 September 2025

#### ABSTRAK

Selat Pantar memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi arus pasang surut sebagai sumber energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lokasi optimal pemasangan turbin dengan melakukan pemodelan hidrodinamika. Pemodelan hidrodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak MIKE Zero, dengan memasukkan data sekunder yang meliputi pasang surut sebagai open boundary condition, data angin dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) sebagai faktor forcing permukaan, serta data batimetri dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) untuk merepresentasikan kondisi kedalaman perairan. Model divalidasi menggunakan data prediksi global dari TPXO (*Tidal Prediction X-bar Orography*), menghasilkan RMSE sebesar 0,3158 dan koefisien korelasi 0,8059, yang menunjukkan akurasi tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Selat Pantar memiliki pola pasang surut condong harian ganda dengan FormZahl 0,7228, serta kecepatan arus maksimum terjadi saat *spring tide* (0,8 m/s) dan menurun pada *neap tide* (0,2–0,5 m/s). Analisis dilakukan pada tiga stasiun. Stasiun 3 memiliki kecepatan arus tertinggi, sehingga direkomendasikan sebagai lokasi utama pemasangan turbin Darrieus, yang memiliki *cut-in speed* 0,5 m/s. Sementara itu, Stasiun 2 dapat menjadi alternatif jika optimalisasi teknologi memungkinkan operasi pada kecepatan lebih rendah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan energi arus pasang surut yang berkelanjutan di Selat Pantar.

**Kata kunci:** Arus pasang surut, Energi terbarukan, Model Hidrodinamika, Selat Pantar, Turbin Darrieus.

#### ABSTRACT

*The Pantar Strait has significant potential in utilizing tidal current energy as a source of renewable energy. This research aims to determine the optimal location for turbine installation by conducting hydrodynamic modeling. Hydrodynamic modeling was performed using MIKE Zero software, incorporating secondary data including tides as open boundary conditions, wind data from ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) as surface forcing factors, and bathymetric*

*data from GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) to represent water depth conditions. The model was validated using global prediction data from TPXO (Tidal Prediction X-bar Orography), resulting in an RMSE of 0,3158 and a correlation coefficient of 0,8059, indicating high accuracy. The simulation results show that the Pantar Strait has a double daily tidal pattern with a FormZahl of 0,7228, and the maximum current velocity occurs during spring tide (0,8 m/s) and decreases during neap tide (0,2–0,5 m/s). The analysis was carried out at three stations. Station 3 has the highest current velocity, so it is recommended as the main location for the installation of the Darrieus turbine, which has a cut-in speed of 0,5 m/s. Meanwhile, Station 2 can be an alternative if technology optimization allows operation at lower speeds. The results of this research are expected to be the basis for the development of sustainable tidal current energy in the Pantar Strait.*

**Keywords:** *Darrieus turbines, Hydrodynamic models, Pantar Strait, Renewable energy, Tidal currents*

## PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan, memiliki luas wilayah perairan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan daratannya, menjadikannya salah satu negara maritim terbesar di dunia. Posisi geografisnya yang strategis, terletak di antara Benua Asia dan Australia serta diapit oleh Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, memberikan potensi sumber daya kelautan yang sangat besar (Hutagalung, 2017). Kondisi ini tidak hanya mendukung sektor perikanan dan transportasi laut, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan sumber energi terbarukan berbasis kelautan. Salah satu bentuk energi laut yang memiliki prospek signifikan untuk dikembangkan adalah energi yang berasal dari arus pasang surut. Energi ini dihasilkan dari pergerakan massa air laut akibat gaya gravitasi bulan dan matahari, menghasilkan pola pasang surut yang bersifat periodik dan lebih dapat diprediksi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya, seperti tenaga surya dan angin (Alnavis *et al.*, 2024). Meskipun memiliki potensi yang besar, pemanfaatan energi pasang surut di Indonesia masih relatif terbatas. Padahal, seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dan keterbatasan cadangan bahan bakar fosil, diversifikasi sumber energi menjadi suatu

kebutuhan dalam upaya mewujudkan ketahanan energi yang berkelanjutan.

Salah satu wilayah yang memiliki potensi signifikan untuk pengembangan energi arus pasang surut adalah Selat Pantar, yang terletak di antara Pulau Pantar dan Pulau Alor di Kabupaten Alor, Nusa Tenggara Timur. Selat ini memiliki karakteristik geografis yang khas, dengan arus laut yang kuat akibat interaksi pasang surut dan dinamika hidrodinamika perairan. Selat Pantar juga dipengaruhi oleh arus lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow*), yang membawa massa air dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia (Yuliardi *et al.*, 2020). Selain itu, kondisi topografi dasar lautnya bervariasi, mencakup perairan dangkal hingga dalam, serta ekosistem penting seperti terumbu karang dan padang lamun. Wilayah pesisir di sekitar Selat Pantar juga menunjukkan karakteristik yang beragam, mulai dari pantai berpasir putih dengan kemiringan landai hingga pantai berbatu dengan lereng yang lebih curam. Struktur garis pantainya dipengaruhi oleh aktivitas geologi serta dinamika laut yang mencakup arus pasang surut dan gelombang (Wabang *et al.*, 2018).

Karakteristik hidrodinamika Selat Pantar menunjukkan potensi yang mendukung

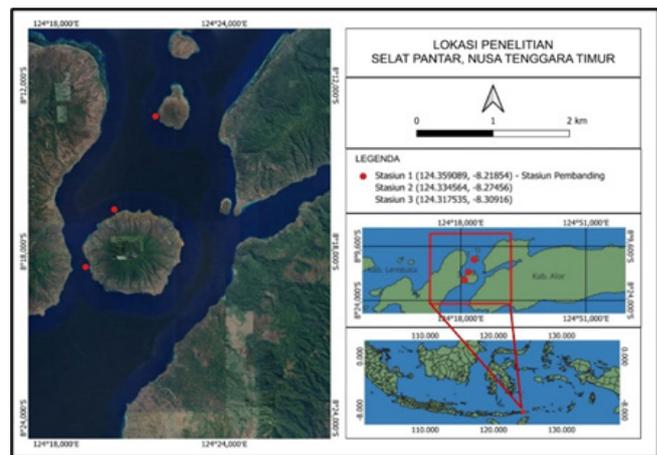
pemanfaatan energi pasang surut, dengan sistem arus yang didominasi oleh pasang surut semi-diurnal, di mana arus bergerak dalam pola periodik dua kali sehari. Selain itu, kondisi batimetri yang terdiri dari kombinasi perairan dangkal dan dalam menciptakan efek penyempitan alami, yang menyebabkan percepatan aliran arus pasang surut (Adiyatno *et al.*, 2017). Studi sebelumnya melaporkan bahwa kecepatan arus di kawasan ini cukup tinggi, terutama saat terjadi *spring tide*, sehingga memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan turbin arus laut (Malau *et al.*, 2018). Namun, untuk menentukan kelayakan pemanfaatan energi pasang surut secara optimal, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pola pergerakan arus dan kestabilannya. Kajian ini dapat dilakukan melalui pemodelan hidrodinamika guna memperoleh representasi yang lebih akurat mengenai dinamika arus di wilayah tersebut.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan arus pasang surut di Selat Pantar, mengevaluasi akurasi model terhadap data prediksi TPXO (*Tidal Prediction X-bar Orography*), serta mengidentifikasi lokasi optimal untuk pemanfaatan energi arus pasang surut. Dengan pemodelan yang terverifikasi, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pola arus di perairan ini, sehingga hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam perencanaan dan pengembangan energi pasang surut yang berkelanjutan di Selat Pantar.

## BAHAN DAN METODE

### Waktu dan Tempat

Daerah kajian penelitian berada di Selat Pantar, Nusa Tenggara Timur, dengan menetapkan tiga stasiun pasang surut sebagai lokasi kajian. Data yang digunakan mencakup periode 1 Januari hingga 31 Januari 2024 untuk menganalisis potensi arus pasang surut sebagai sumber energi



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian.  
Figure 1. Map of The Research Location.

terbarukan. Pengolahan dan analisis data dilakukan selama pelaksanaan Kerja Praktik di Laboratorium Hidro-Oseanografi, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), Jakarta Utara, pada 6 Januari hingga 14 Februari 2025.

Dalam penelitian ini, berbagai jenis data digunakan untuk melakukan pemodelan arus pasang surut di Selat Pantar. Data prediksi pasang surut diperoleh dari website Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) milik Badan Informasi Geospasial (BIG) untuk periode 1–31 Januari 2024, yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan pasang surut. Selain itu, data prediksi pasang surut global dari *Tidal Prediction X-bar Orography* (TPXO) (<https://www.tpxo.net/global>) dimanfaatkan untuk validasi pola pasang surut dalam cakupan yang lebih luas. Data angin dari *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/>) untuk periode yang sama diterapkan guna mempertimbangkan pengaruh angin terhadap dinamika arus permukaan. Sementara itu, data batimetri dari *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) (<https://www.gebco.net/>) digunakan untuk menentukan distribusi kedalaman perairan, yang berperan dalam memengaruhi pola arus pasang surut. Untuk memperjelas batas wilayah dalam pemodelan, garis pantai hasil digitasi citra satelit turut digunakan.

Beberapa perangkat lunak diterapkan dalam penelitian ini guna memastikan keakuratan dalam pengolahan data dan pemodelan. Pemodelan arus pasang surut dilakukan menggunakan MIKE Zero sebagai perangkat lunak utama dalam simulasi hidrodinamika, dengan modul MIKE 3FM (*Flexible Mesh*) untuk membentuk unstructured triangular mesh dan menerapkan kondisi batas pasang surut sebagai *open boundary*, serta pantai sebagai *closed boundary*. Konfigurasi ini memungkinkan representasi geometris domain yang kompleks dan validasi terhadap pola arus. Pendekatan serupa telah sukses digunakan oleh Kurnia Malik *et al.* (2023), yang memodelkan dinamika arus di Selat Lombok dengan metode dan software serupa, serta divalidasi terhadap data arus dan pasang surut lapangan. *Quantum Geographic Information System* (QGIS) digunakan untuk mengonversi data batimetri ke dalam format raster serta melakukan digitasi garis pantai guna meningkatkan resolusi spasial sebelum dimasukkan ke dalam pemodelan. *Ocean Data View* (ODV) dimanfaatkan untuk mengonversi data angin dari format .NC ke .txt agar kompatibel dengan perangkat lunak pemodelan hidrodinamika. Selain itu, Microsoft Excel digunakan dalam berbagai proses perhitungan tambahan, termasuk analisis statistik, ekstraksi data model, serta validasi hasil simulasi.

### Tahapan Pemodelan Arus Pasang Surut

Pemodelan arus pasang surut dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis. Tahap pertama melibatkan pengolahan data awal, di mana data batimetri dari GEBCO dikonversi ke dalam format raster menggunakan perangkat lunak QGIS. Setelah itu, proses interpolasi dilakukan untuk memperoleh kontur kedalaman yang lebih halus. Data garis pantai hasil digitasi citra satelit kemudian dikombinasikan dengan data batimetri guna menentukan batas domain pemodelan. Data angin dari ECMWF dikonversi menggunakan ODV agar sesuai dengan format yang diperlukan dalam

perangkat lunak pemodelan. Selanjutnya, data pasang surut dari SRGI BIG diolah ke dalam bentuk time series menggunakan MIKE Zero sebelum dilakukan analisis lebih lanjut untuk memperoleh Parameter harmonik yang digunakan dalam simulasi adalah konstanta-konstanta pasut yang signifikan ( $SNR_{T-Tide} > 2$ ) pada lokasi studi, yaitu SA, SSA, MSF, NO, J, dan TAU.

Tahap berikutnya adalah penyusunan mesh dan grid domain, di mana domain pemodelan dibagi menjadi elemen segitiga tak beraturan (*unstructured mesh*). Setelah mesh terbentuk, proses pemasukan batas awal dan batas kondisi dilakukan, dengan data pasang surut digunakan sebagai batas kondisi terbuka (*open boundary condition*), sementara batas daratan didefinisikan sebagai batas tertutup (*closed boundary*). Prosedur ini sejalan dengan penelitian sebelumnya (GJESM, 2023), yang juga menerapkan pembagian domain dengan *unstructured* mesh serta penggunaan pasang surut sebagai batas terbuka dan daratan sebagai batas tertutup, sehingga rancangan pemodelan dalam penelitian ini dapat distasi atau dibandingkan dengan hasil studi terdahulu.

Setelah mesh dan batas kondisi ditetapkan, tahap selanjutnya adalah penentuan timestep dan parameter model. Dalam pemodelan ini, *timestep* sebanyak 744 digunakan dengan interval 1 jam (3600 detik) untuk menjaga kestabilan numerik model. Simulasi dilakukan selama periode 1–31 Januari 2024, dengan beberapa hari pertama digunakan sebagai periode spin-up untuk mencapai kondisi model yang stabil sebelum dilakukan analisis data. Data angin dimasukkan sebagai faktor eksternal yang berpengaruh terhadap pemodelan.

Tabel 1. Hasil Mesh Permukaan dan Kedalaman  
*Table 1. Surface and Depth Mesh Results*

Jumlah Elemen	Jumlah Titik
15535	9606

Parameter lainnya, seperti densitas air, viskositas turbulen, koefisien gesekan dasar laut, serta parameter hidrodinamika lainnya, menggunakan nilai default dari perangkat lunak MIKE 21.

**Root Mean Square Error**

Validasi hasil simulasi model dilakukan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE merupakan akar kuadrat dari rata-rata kesalahan kuadrat yang dihasilkan dalam suatu metode perhitungan. Metode ini digunakan untuk membandingkan nilai prediksi model terhadap nilai observasi (Prasetyo *et al.*, 2021). Model dianggap memiliki tingkat validitas yang dapat diterima apabila nilai RMSE yang diperoleh berada di bawah 40% (Rahma *et al.*, 2024). RMSE dihitung menggunakan persamaan 1 (Prasetyo *et al.*, 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - X_{b,i})^2}{n}} \dots\dots\dots 1)$$

Dengan  $X_{a,i}$  adalah nilai data aktual,  $X_{b,i}$  merupakan nilai data prediksi, dan  $n$  merupakan jumlah data.

**Korelasi Pearson**

Koefisien korelasi linier ( $r$ ), yang dikembangkan oleh Karl Pearson, digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel. Koefisien korelasi ini dihitung dengan menerapkan persamaan 2 (Sitanaya *et al.*, 2020).

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots\dots\dots 2)$$

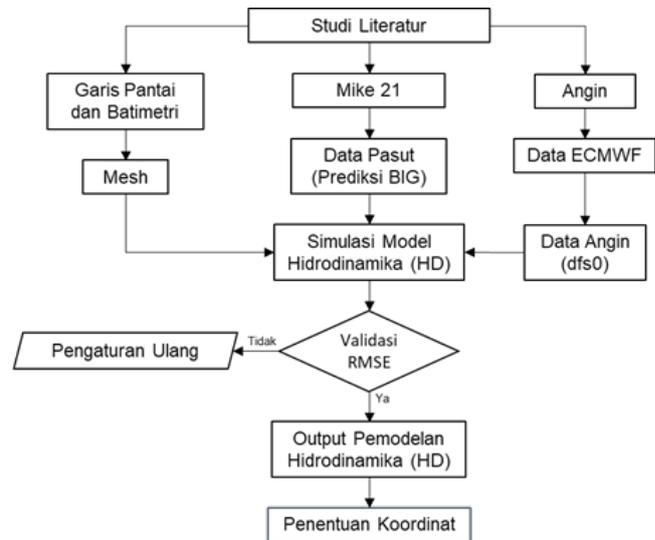
Dimana  $X$  adalah variabel pertama,  $Y$  merupakan variabel kedua, dan jumlah data dilambangkan dengan  $n$ . Untuk ketentuan nilai dari korelasi pearson dapat dilihat dalam Tabel 2.

Setelah model tervalidasi, hasil akhir dianalisis untuk mengidentifikasi lokasi optimal bagi pemanfaatan energi arus pasang

Tabel 1. Hasil Mesh Permukaan dan Kedalaman  
*Table 1. Surface and Depth Mesh Results*

Besaran Korelasi	Tingkat Hubungan
0.00 - 0.19	Sangat rendah
0.20 - 0.39	Rendah
0.40 - 0.59	Sedang
0.60 - 0.79	Kuat
0.80 - 1.00	Sangat kuat

Sumber: Sitanaya *et al.*, 2020



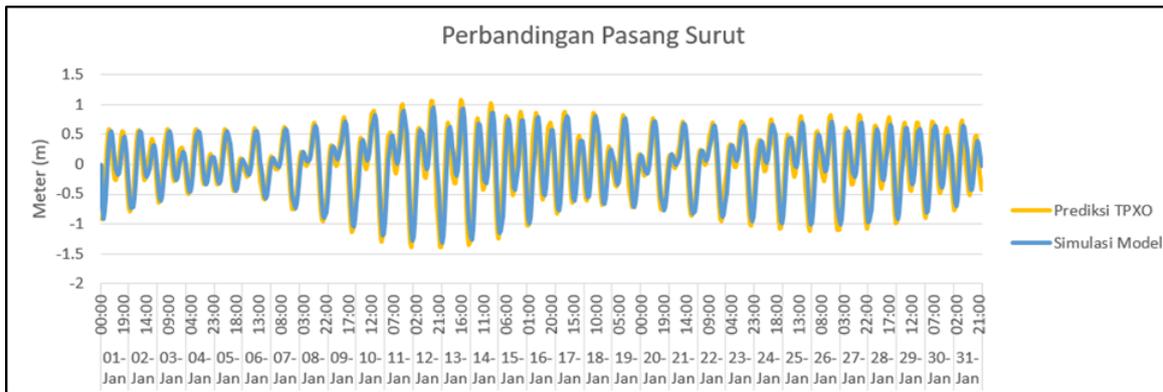
Gambar 2. Diagram Alir.  
*Figure 2. Flowchart.*

surut. Parameter utama yang digunakan dalam analisis ini mencakup kecepatan arus maksimum serta kestabilan arus selama periode simulasi.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Validasi Hasil Model**

PerhitungannilaiFormZahl menunjukkan angka 0,7228, yang mengindikasikan bahwa Selat Pantar memiliki pola pasang surut tipe condong harian ganda, dengan dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari. Pola ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa tipe harian ganda lebih dominan di perairan Indonesia bagian timur dan cenderung menghasilkan pola arus yang lebih stabil dibandingkan dengan tipe diurnal (Umam *et al.*, 2022). Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data global dari TPXO pada koordinat 124,3314° BT dan -8,2765°



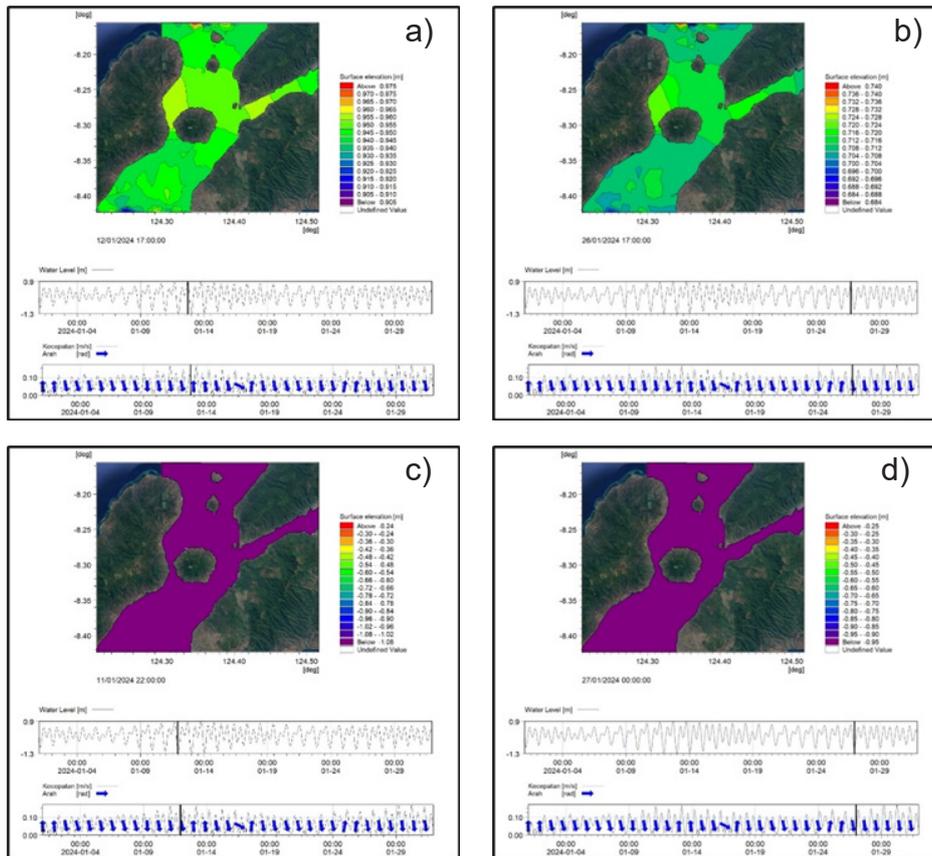
Gambar 3. Grafik Perbandingan Pasang Surut Hasil Model dan Prediksi TPXO.  
 Figure 3. Comparison Chart of Tidal Results of Model and TPXO Prediction.

LS. Perbandingan ini menunjukkan bahwa model memiliki nilai RMSE sebesar 0,3158 dan koefisien korelasi sebesar 0,8059, yang mengindikasikan bahwa model mampu merepresentasikan pola arus pasang surut dengan akurasi yang baik. Capaian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa model dengan nilai RMSE di bawah 0,4 memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima dalam pemodelan energi pasang surut (Rahma *et al.*, 2024).

Model ini dikembangkan berdasarkan dua faktor utama, yaitu pasang surut dan angin. Faktor lain seperti arus geostrofik, perubahan densitas akibat suhu dan salinitas, serta pengaruh fenomena oseanografi yang lebih kompleks tidak dimasukkan dalam simulasi. Selain itu, artikel ini juga tidak melakukan perhitungan konversi kecepatan arus menjadi estimasi daya listrik, sehingga hasil yang diperoleh hanya terbatas pada gambaran pola arus hidrodinamika. Selain itu, kondisi batimetri Selat Pantar juga berkontribusi terhadap validitas model, mengingat kedalaman perairan di wilayah ini berkisar antara 50 hingga 700 meter. Daerah dengan kedalaman lebih dangkal cenderung mengalami percepatan arus akibat efek penyempitan alami, sementara daerah yang lebih dalam memungkinkan penyebaran energi yang lebih luas. Temuan ini konsisten dengan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa batimetri memiliki peran penting dalam distribusi pasang

surut (Putra *et al.*, 2021). Analisis yang dilakukan juga mendukung penelitian sebelumnya di Pantai Gosong dan Lembeh, yang menunjukkan bahwa pemodelan hidrodinamika dengan mempertimbangkan pasang surut sebagai penggerak utama arus mampu merepresentasikan pola arus dengan tingkat kesalahan yang rendah (Hiwari dan Subiyanto, 2020; Wiyadi *et al.*, 2022)

Gambar 4a menunjukkan kondisi pasang tertinggi saat *spring tide* dengan colorbar elevasi muka laut berkisar -0,20 hingga 0,98 meter, sedangkan Gambar 4b pada surut terendah saat *spring tide* memperlihatkan rentang yang lebih ekstrem yaitu -1,32 hingga 0,08 meter. Hal ini menandakan fluktuasi muka laut pada periode *spring tide* relatif besar, sehingga menghasilkan arus yang lebih kuat. Sementara itu, Gambar 4c) memperlihatkan kondisi pasang tertinggi saat neap tide dengan colorbar berada pada kisaran -0,23 hingga 0,72 meter, dan Gambar 4d) pada surut terendah saat neap tide menunjukkan kisaran -0,82 hingga 0,13 meter. Jika dibandingkan dengan *spring tide*, terlihat jelas bahwa skala colorbar pada kondisi neap tide lebih sempit, mencerminkan amplitudo pasang surut yang lebih kecil. Dengan kata lain, perbedaan nilai pada colorbar antar gambar secara langsung menunjukkan perbedaan amplitudo pasang surut, *spring tide* menghasilkan rentang elevasi muka laut yang lebih luas dan arus yang lebih kuat, sedangkan neap tide memiliki rentang lebih sempit dengan arus yang relatif



Gambar 4. Kondisi pasang surut: a) pasang saat spring tide, b) pasang saat neap tide, c) surut saat spring tide, d) surut saat neap tide.

Figure 4. Tidal conditions: a) high tide during spring tide, b) high tide during neap tide, c) low tide during spring tide, d) low tide during neap tide.

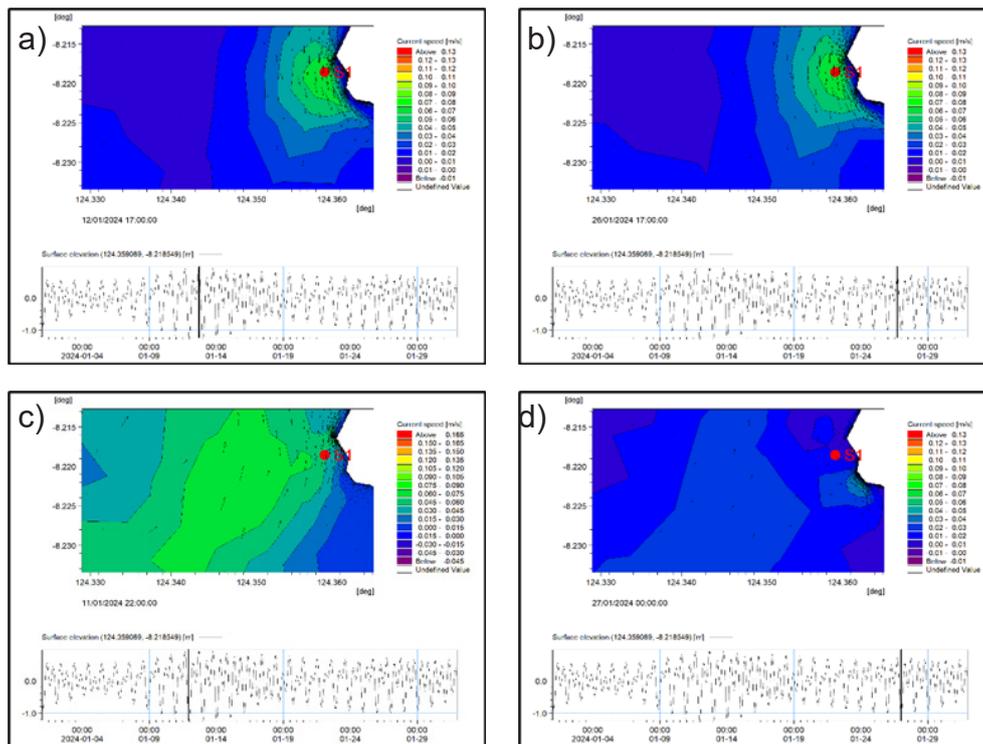
lemah.

Hasil simulasi mendukung temuan tersebut, di mana pada saat *spring tide* arus bergerak ke utara dengan kecepatan maksimum mencapai 0,8 m/s, kemudian berbalik ke selatan saat surut dengan kecepatan serupa. Perbedaan ketinggian muka air yang besar pada periode ini meningkatkan kecepatan arus karena gaya gravitasi bulan dan matahari berada pada satu garis lurus (Rienetza *et al.*, 2024). Sebaliknya, pada periode neap tide, arus bergerak ke selatan dengan kecepatan lebih rendah sekitar 0,2–0,5 m/s, dan saat surut tetap dominan ke selatan dengan kecepatan 0,1–0,3 m/s. Kecepatan arus yang lebih rendah ini disebabkan oleh gaya tarik gravitasi bulan dan matahari yang bekerja dalam arah tegak

lurus, sehingga menghasilkan amplitudo pasang surut lebih kecil (Nadira *et al.*, 2023). Analisis model juga memperlihatkan bahwa variasi kedalaman berperan penting: pada perairan dangkal (<200 m) kecepatan arus dapat meningkat 15–30% akibat efek Venturi dari penyempitan perairan, sedangkan pada perairan lebih dalam (>500 m), energi arus lebih tersebar sehingga kecepatannya lebih rendah (Piani *et al.*, 2022). Hal ini menegaskan bahwa selain faktor astronomis, batimetri dan morfologi perairan turut menentukan intensitas arus pasang surut serta potensi konversi energi di wilayah penelitian.

### Identifikasi Lokasi Potensial Stasiun 1

Berdasarkan hasil simulasi hidrodinamika yang ditunjukkan pada Gambar 5, kondisi arus



Gambar 5. Kondisi pasang surut di Stasiun 1: a) pasang saat *spring tide*, b) pasang saat *neap tide*, c) surut saat *spring tide*, d) surut saat *neap tide*.  
 Figure 5. Tidal conditions at Station 1: a) high tide during *spring tide*, b) high tide during *neap tide*, c) low tide during *spring tide*, d) low tide during *neap tide*.

di Stasiun 1 memperlihatkan variasi yang cukup jelas antara periode pasang–surut serta antara fase *spring tide* dan *neap tide*. Pada saat pasang *spring tide* (Gambar 5a), terlihat area dengan kecepatan arus yang relatif tinggi, yaitu berkisar antara 0,10–0,13 m/s, terutama terkonsentrasi di sekitar mulut teluk. Distribusi arus ini menunjukkan bahwa energi kinetik maksimum cenderung muncul ketika amplitudo pasang surut mencapai nilai tertinggi, sejalan dengan peningkatan gradien muka laut. Sebaliknya, pada kondisi pasang *neap tide* (Gambar 5c), kecepatan arus mengalami penurunan signifikan dengan kisaran hanya 0,05–0,08 m/s, sehingga memperlihatkan pola sirkulasi yang lebih lemah.

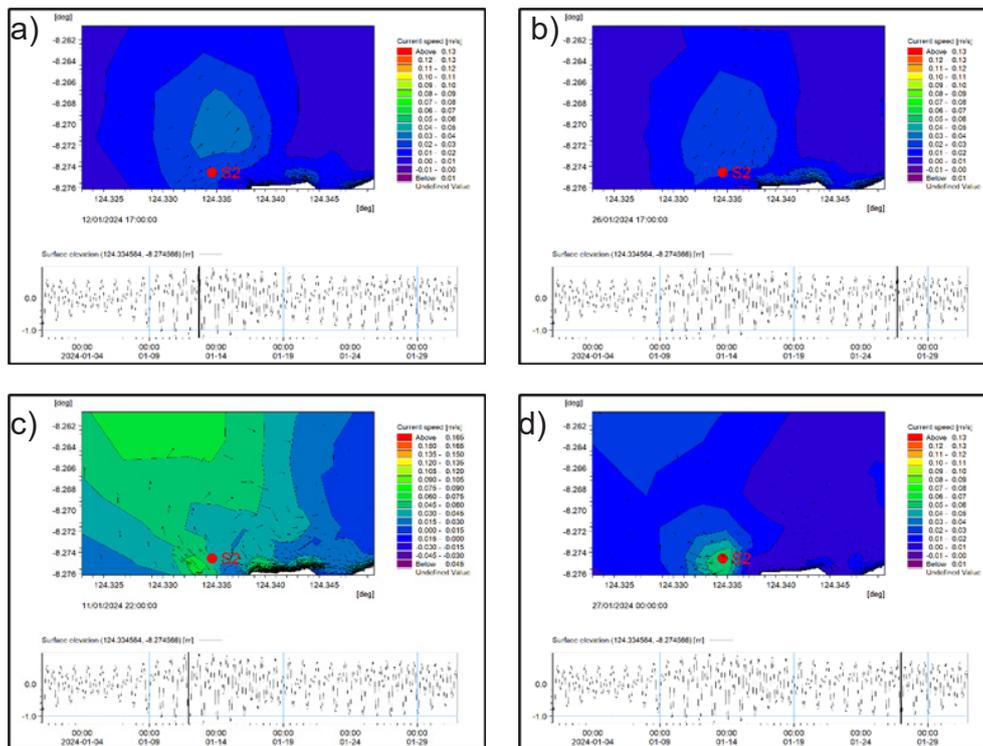
Pada fase surut *spring tide* (Gambar 5b), arus kembali memperlihatkan intensitas yang cukup besar, dengan nilai maksimum mencapai 0,12–0,165 m/s di beberapa titik dekat perairan dangkal. Hal ini menunjukkan bahwa aliran keluar selama surut dengan

amplitudo besar menghasilkan energi kinetik yang relatif lebih kuat dibandingkan kondisi pasang. Namun demikian, saat surut *neap tide* (Gambar 5d), distribusi arus cenderung melemah dengan dominasi kecepatan <0,07 m/s, ditandai dengan dominasi warna biru pada peta kontur.

### Stasiun 2

Lokasi potensial pemasangan turbin arus laut di Stasiun 2 adalah pada area berwarna hijau–kuning dekat pantai timur laut domain model (sekitar 124,36° BT dan -8,218° LS), karena di titik tersebut kecepatan arus mencapai nilai maksimum selama kondisi pasang purnama (*spring tide*). Meskipun demikian, nilai arus yang relatif kecil (<0,15 m/s) menunjukkan bahwa potensi energi lebih sesuai untuk aplikasi lokal skala kecil, dan perlu pengukuran lapangan lebih detail untuk validasi.

Stasiun 2 memiliki potensi pemasangan turbin pada area berwarna hijau–kuning yang



Gambar 6. Kondisi pasang surut di Stasiun 2: a) pasang saat *spring tide*, b) pasang saat *neap tide*, c) surut saat *spring tide*, d) surut saat *neap tide*.

Figure 6. Tidal conditions at Station 2: a) high tide during *spring tide*, b) high tide during *neap tide*, c) low tide during *spring tide*, d) low tide during *neap tide*.

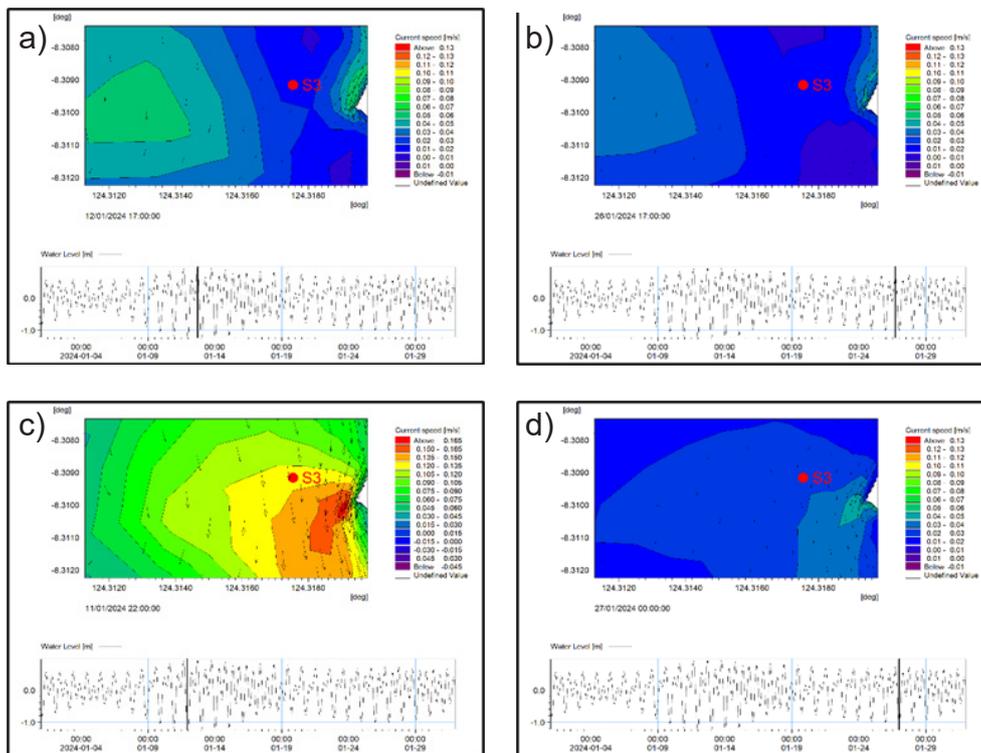
menunjukkan kecepatan arus maksimum saat *spring tide* (0,12–0,165 m/s). Lokasi ini lebih menjanjikan dibanding Stasiun 1 karena arus maksimum lebih tinggi, tetapi fluktuasi signifikan antara *spring* dan *neap tide* perlu diperhatikan. Potensi energi dari arus laut di lokasi ini lebih sesuai untuk pembangkit skala kecil atau penelitian pilot project, bukan skala besar komersial.

### Stasiun 3

Berdasarkan hasil simulasi, tiga lokasi diuji untuk menentukan koordinat optimal bagi pemanfaatan energi arus pasang surut. Stasiun 3 ( $124,317535^{\circ}$  BT,  $-8,30916^{\circ}$  LS) memiliki kecepatan maksimum 0,801585 m/s, yang mendekati batas operasional minimum untuk konversi energi pasang surut, dapat diamati pada Gambar 7. Namun, kecepatan minimumnya yang sangat rendah (0,00061135 m/s) berpotensi menghambat kontinuitas pembangkitan energi. Stasiun 2 ( $124,334564^{\circ}$  BT,  $-8,27456^{\circ}$  LS) memiliki

kecepatan maksimum 0,473209 m/s, dengan variasi pasang surut yang lebih stabil dibandingkan Stasiun 3, tetapi masih berada di bawah ambang batas optimal. Sementara itu, Stasiun 1 ( $124,359089^{\circ}$  BT,  $-8,21854^{\circ}$  LS) memiliki kecepatan maksimum hanya 0,16952 m/s, yang terlalu rendah untuk pemanfaatan energi pasang surut secara efektif.

Di antara ketiga lokasi tersebut, Stasiun 3 memiliki potensi terbesar sebagai lokasi pemasangan turbin, meskipun fluktuasi kecepatan arus tetap menjadi tantangan yang perlu diperhitungkan. Untuk mendukung konversi energi yang optimal, turbin sumbu vertikal tipe Darrieus menjadi salah satu pilihan yang sesuai dengan kondisi ini. Turbin ini memiliki kapasitas 2 kW dengan *cut-in speed* sekitar 0,5 m/s dan telah diuji coba di Selat Madura. *Cut-in speed* 0,5 m/s menunjukkan bahwa turbin baru mulai menghasilkan listrik ketika kecepatan arus mencapai 0,5 meter per detik. Kecepatan arus tersebut berada



Gambar 7. Kondisi pasang surut di Stasiun 3: a) pasang saat *spring tide*, b) pasang saat *neap tide*, c) surut saat *spring tide*, d) surut saat *neap tide*.

Figure 7. Tidal conditions at Station 3: a) high tide during *spring tide*, b) high tide during *neap tide*, c) low tide during *spring tide*, d) low tide during *neap tide*.

dekat dengan *cut-in speed* 0,5 m/s dari turbin vertikal tipe Darrieus, yang telah diuji di Selat Madura. Meskipun studi sebelumnya menggunakan turbin Helix LC 500 pada kedalaman >100 m (Pratomo *et al.*, 2016), pendekatan ini memberikan indikasi bahwa turbin Darrieus bisa digunakan untuk kondisi arus permukaan atau mid-depth dengan kecepatan arus serupa. Jika kecepatan arus berada di bawah nilai ini, turbin tetap berputar tetapi tidak cukup untuk menghasilkan daya listrik yang signifikan (Fajar *et al.*, 2014; Firdaus *et al.*, 2014). Pada percobaan yang dilakukan oleh Fajar *et al.* (2014) di Selat Madura, turbin tetap dapat bekerja dengan baik meskipun kecepatan arus rata-rata hanya 0,47 m/s, yang sedikit di bawah *cut-in speed*. Hal ini menunjukkan bahwa desain turbin cukup sensitif terhadap arus rendah, sehingga masih mampu beroperasi meskipun dalam kondisi kecepatan arus yang tidak terlalu tinggi.

Selain mempertimbangkan kecepatan

arus, karakteristik morfologi dasar laut juga menjadi faktor penting dalam pemilihan lokasi pemasangan turbin. Koordinat yang dipilih memiliki batimetri dengan kedalaman antara 15 hingga 35 meter, yang tergolong ideal untuk pemasangan turbin arus laut skala kecil hingga menengah. Wilayah dengan dasar laut yang terlalu curam atau memiliki struktur yang tidak stabil dapat menyebabkan perubahan pola aliran yang tidak terduga, sehingga dapat memengaruhi efisiensi operasional turbin. Oleh karena itu, studi lebih lanjut mengenai kestabilan dasar laut dan dinamika arus jangka panjang perlu dilakukan untuk memastikan keberlanjutan proyek pemanfaatan energi pasang surut di Selat Pantar. Dengan mempertimbangkan hasil pemodelan serta spesifikasi turbin, Stasiun 3 direkomendasikan sebagai lokasi utama untuk pemasangan turbin, sedangkan Stasiun 2 dapat dijadikan sebagai alternatif jika terdapat optimalisasi teknologi yang memungkinkan operasi pada kecepatan lebih rendah.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Selat Pantar memiliki potensi untuk pemanfaatan energi arus pasang surut, dengan validasi model yang menunjukkan nilai RMSE 0,3158 dan korelasi 0,8059, menandakan tingkat akurasi yang baik. Tipe pasang surut di wilayah ini termasuk dalam campuran condong harian ganda, dengan kecepatan maksimum terjadi saat *spring tide* dan menurun saat neap tide. Dari tiga lokasi yang dianalisis, Stasiun 3 memiliki kecepatan arus tertinggi (0,801585 m/s), namun dengan fluktuasi yang cukup signifikan, sedangkan Stasiun 2 memiliki arus yang lebih stabil tetapi masih di bawah ambang batas optimal untuk konversi energi pasang surut. Meskipun Stasiun 3 memiliki kecepatan arus tertinggi, kestabilan arus di Stasiun 2 juga dapat menjadi pertimbangan sebagai lokasi alternatif.

Dengan demikian, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada perhitungan konversi daya listrik dari arus pasang surut untuk menentukan estimasi produksi energi di lokasi yang telah diidentifikasi. Selain itu, studi lebih mendalam mengenai efisiensi turbin dalam berbagai kondisi arus serta pengaruh turbulensi dan morfologi dasar laut terhadap kinerja turbin juga diperlukan. Pengujian lapangan dengan metode observasi jangka panjang dapat dilakukan untuk meningkatkan akurasi pemodelan dan memastikan keberlanjutan energi yang dihasilkan di Selat Pantar.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Angkatan Laut, Program Studi Hidrografi, yang telah memberikan fasilitas serta bahan ajar yang mendukung kelancaran penelitian ini. Selain itu, penghargaan juga disampaikan kepada TPXO, yang menyediakan data prediksi

pasang surut global sebagai acuan dalam pemodelan arus pasang surut di Selat Pantar. Terimakasih kepada ECMWF, GEBCO dan ODV yang membantu mendapatkan data sekunder serta pengolahan data. Dukungan dari berbagai pihak tersebut sangat berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiyatno, S., Rifa'i, M. A., dan Dewi, I. P. (2017). Pemetaan Karakteristik Pasang Surut Dan Batimetri Di Selat Semau Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Marine Coastal and Small Islands Journal - Jurnal Ilmu Kelautan*, 1(1), 44. <https://doi.org/10.20527/m.v1i1.3307>
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., dan Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2), 119–139. <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544>
- Firdaus, A. M., Kusumastanto, T., Studi, P., Sumberdaya, E., Tropika, K., Bogor, I. P., dan Nurjaya, W. (2014). Analisis Kelayakan Teknis dan Finansial Pengembangan Energi Arus Laut di Selat Madura. *Jurnal Aplikasi Manajemen*, 12(3), 512–520.
- Hiwari, H., & Subiyanto. (2020). Pemodelan Arus Permukaan Laut Lembeh, Sulawesi Utara Menggunakan Aplikasi Mike 21. *Jurnal Akuatek*, 2(1), 84–93.
- Hutagalung, S. M. (2017). Penetapan Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI): Manfaatnya Dan Ancaman Bagi Keamanan Pelayaran Di Wilayah Perairan Indonesia. *Jurnal Asia Pacific Studies*, 1(1), 75. <https://doi.org/10.33541/japs.v1i1.502>

- Malau, K. R., Budiarto, U., & Hadi, E. S. (2018). Desain Dan Analisa Turbin Tipe H-Rotor Guna Meningkatkan Output Daya Listrik Pada Perencanaan Pembangunan PLTAL Di Selat Pantar. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, 15(1), 24–32. <https://doi.org/10.14710/kpl.v15i1.18467>
- Nadira, A. I., Ismanto, A., Hakim, A. R., dan Ramdhani, A. (2023). Tinjauan Pengaruh Pasang Surut Terhadap Arus Permukaan Menggunakan Data HF Radar di Perairan Selat Sunda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(4), 256-264. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i4.16834>
- Piani., Kushadiwijayanto, A. A., & Risiko. (2022). Kalimantan Barat Study of Bathymetry and Tidal Type in Bawal Island Waters. *Oceanologia*, 1(3), 106–111.
- Prasetyo, V. R., Lazuardi, H., Mulyono, A. A., & Lauw, C. (2021). Penerapan Aplikasi RapidMiner Untuk Prediksi Nilai Tukar Rupiah Terhadap US Dollar Dengan Metode Linear Regression. *Jurnal Nasional Teknologi dan Sistem Informasi*, 7(1), 8–17. <https://doi.org/10.25077/teknosi.v7i1.2021.8-17>
- Purnomo, F., Purwanto., & Indrayanti, Elis. (2014). Kajian Potensi Arus Laut Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Di Perairan Sekitar Jembatan Suramadu Selat Madura. *Jurnal Oseanografi*, 3(3), 294–303.
- Putra, R. Y., Indrayanti, E., Ismunarti, D. H., Handoyo, G., & Ismanto, A. (2021). Pola Arus Perairan Kemujan, Karimunjawa Pada Musim Peralihan II Dengan Menggunakan Model Delft3D. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(3), 306–321. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i3.12141>
- Rahma, A. A., Adrianto, D., & Malik, K. (2024). Pemodelan Numerik Arus Pasang Surut 2D Menggunakan Software Mike 21 (Studi Kasus Selat Bangka). *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 4(2), 87–94. <https://doi.org/10.62703/jhi.v4i2.36>
- Rienetza, A. Z., Zahrina W., N., Yanfeto, B., & Agassi, R. N. (2024). Pemodelan Arus Pasang Surut dan Gelombang 2D Menggunakan Metode Numerik dengan Flow Model dan Spectral Wave Software Mike 21 di Perairan Tanjung Mulang Hingga Teluk Meru pada Bulan Januari 2022. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 5(2), 57–66. <https://doi.org/10.62703/jhi.v5i2.21>
- Sitanaya, B. C., Zakaria, A., dan Winarno, D. J. (2020). Analisis Perbandingan Data Pemodelan Pasang Surut BIG Dengan Data Pengukuran Pasang Surut UHSLC Pada Stasiun Sadeng. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(3), 469–482.
- Umam, C., Pranowo, W. S., & Fatoni, K. I. (2022). Studi Perbandingan Karakteristik Pasang Surut Hasil Perhitungan Data Lokal Dengan Model Pasang Surut Global di Perairan Indonesia. *Jurnal Chart Datum*, 5(2), 97-112. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v5i2.149>
- Yuliardi, A. Y., Prayogo, L. M., & Joesidawati, M. I. (2022). Dinamika Distribusi Spasial-Vertikal Massa Air di Jalur Barat dan Timur Arlindo pada Musim Barat: Dynamics of the Spatial-Vertical Distribution of Water Masses in the West and East Indonesian Throughflow Routes in the Wet Season. *Jurnal Miyang: Ronggolawe Fisheries and Marine Science Journal*, 2(2), 38-46.
- Wabang, I. L., Yulianda, F., & Susanto, H. A. (2018). Kajian Karakteristik Tipologi Pantai Untuk Pengembangan Wisata Rekreasi Pantai Di Suka Alam Perairan Selat Pantar Kabupaten

Alor. *ALBACORE Jurnal Penelitian Perikanan Laut*, 1(2), 199–209. <https://doi.org/10.29244/core.1.2.199-209>

Wiyadi, H. T., Muslim, M., & Marwoto, J. (2022). Pemodelan Hidrodinamika pada Musim Barat di Pantai Gosong Kalimantan Barat sebagai Calon Tapak PLTN Pertama di Indonesia pada Tahun 2025. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(2), 97–106. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i2.14308>

