Volume 18, No. 3, 2025

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

PEMODELAN GELOMBANG LAUT DI PANTAI KIJING KABUPATEN MEMPAWAH DENGAN PENDEKATAN KOMPUTASI DINAMIKA FLUIDA

MODELING OF OCEAN WAVES ON THE KIJING BEACH OF MEMPAWAH DISTRICT USING A FLUID DYNAMICS COMPUTATIONAL APPROACH

Nadya Okviani[1], Yoga Satria Putra[1], Randy Ardianto[2], Muliadi[1], Riza Adriat[1]

[1]Program Studi Geofisika, Fakultas Matematikan dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Tanjungpura,
Jl. Profesor Dokter H. Hadari Nawawi, Bansir Laut, Kec. Pontianak Tenggara, Kota Pontianak,
[2]Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak
Jl. Pelabuhan (kompleks pelabuhan Dwikora) Kota Pontianak, Kalimantan Barat

*Corresponding author email: yogasatriaputra@physics.untan.ac.id

Submitted: 17 September 2024 / Revised: 26 September 2025 / Accepted: 21 November 2025

http://doi.org/10.21107/jk.v18i3.27496

ABSTRACT

Simulation and prediction of extreme waves are important issues in disaster mitigation and coastal infrastructure governance. Kijing Beach is one of the beaches in the West Kalimantan region, Mempawah, which often experiences high wave phenomena, one of which occurred on July 14, 2021, at 02.00 WIB which resulted in the collapse of the connecting road between the pier and the Kijing Port. Information on the mechanism of the occurrence of this large wave is quite important to study in more depth. This research applies a computational approach to fluid dynamics with Delft3D software using input data in the form of tidal components from TPXO 08, surface pressure & wind components u and v from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and bathymetry data from the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Wave modeling has been successfully carried out, which is validated using tidal data from the Automatic Weather Station (AWS) from the Pontianak Maritime Meteorological Station by showing the percentage value of the Mean Absolute Error (MAE) of 0.089. The value is included in the small category, and the correlation coefficient value is in a very strong category with a value of 0.96. Significant wave height analysis has also been successfully carried out by analyzing sampling points and spatial models, which show wave height results around Kijing Port ranging from 0.03 m to 0.21 m, and the dominant direction moves from the south to the northwest, north, and northeast.

***Keywords**: Computational Fluid Dynamics, Delft3D, Kijing Beach, Ocean waves, Significant wave height.*

ABSTRAK

Simulasi dan prediksi gelombang ekstrem merupakan suatu isu penting dalam melakukan mitigasi bencana dan tata kelola infrastruktur pesisir pantai. Pantai Kijing merupakan salah satu pantai di wilayah Kalimantan Barat, Mempawah yang sering mengalami fenomena gelombang tinggi, salah satunya terjadi pada tanggal 14 Juli 2021 pukul 02.00 WIB yang mengakibatkan jalan penghubung antara dermaga dan Pelabuhan Kijing roboh. Informasi mekanisme terjadinya gelombang besar ini cukup penting dikaji secara lebih mendalam. Penelitian ini menerapkan pendekatan komputasi dinamika fluida dengan software Delft3D menggunakan data input berupa komponen pasang surut dari TPXO 08, tekanan permukaan & komponen angin u dan v dari European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), dan data batimetri dari General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Pemodelan gelombang telah berhasil dilakukan yang divalidasi menggunakan data pasang surut dari Automatic Weather Station (AWS) dari Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak dengan menunjukkan nilai persentase kesalahan rata-rata absolut atau Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,089 dan nilainya tersebut masuk pada kategori kecil, kemudian untuk nilai koefisien korelasi masuk pada kategori yang sangat kuat dengan nilai sebesar 0,96. Analisis tinggi gelombang signifikan juga telah berhasil dilakukan dengan menganalisis sampling point dan spasial model yang menunjukkan

hasil tinggi gelombang di sekitar Pelabuhan Kijing berkisar antara 0,03 m hingga 0,21 m dan arahnya dominan bergerak dari arah selatan menuju ke barat laut, utara dan timur laut.

***Kata kunci**: Delft3D, Gelombang laut, Komputasi dinamika fluida, Pantai Kijing, Tinggi gelombang signifikan.*

PENDAHULUAN

Simulasi dan prediksi gelombang ekstrem merupakan isu penting dalam mitigasi bencana serta tata kelola infrastruktur pesisir. Beberapa dampak dari gelombang laut tinggi di antaranya adalah mundurnya garis pantai pada pemukiman penduduk di wilayah pesisir (Indiani *et al.,* 2018). Selain itu, transportasi laut yang melewati perairan pantai juga terganggu keamanannya ketika gelombang berada dalam kondisi ekstrem (Saad *et al.,* 2021). Urgensi ini semakin nyata di Pantai Kijing, Kabupaten Mempawah, Kalimantan Barat, yang pada 14 Juli 2021 pukul 02.00 WIB mengalami kerusakan infrastruktur akibat gelombang besar yang merobohkan jalan penghubung antara dermaga dan Pelabuhan Kijing. Kasus ini menegaskan pentingnya kajian ilmiah mengenai mekanisme terjadinya gelombang di kawasan tersebut.

Kajian gelombang laut di berbagai wilayah Indonesia telah banyak dilakukan. Liufandy *et al.* (2022) menganalisis simulasi numerik dampak badai George dan Jacob (2007) terhadap gelombang signifikan di Laut Selatan Jawa hingga Nusa Tenggara. Roem *et al.* (2015) memodelkan prediksi gelombang berbasis data vektor angin di perairan Tarakan. Rafiuddin *et al.* (2018) menggunakan model Simulating Waves Nearshore (SWAN) untuk menganalisis pembangkitan gelombang oleh angin di Selatan Jawa. Mustafa (2017) mengkaji gelombang akibat angin di Pantai Puger Jember dengan Delft3D. Fauzan *et al.* (2021) meneliti run-up gelombang pada jetty di Pelabuhan Tegalsari, sementara Ali *et al.* (2022) melakukan pemodelan tinggi gelombang untuk potensi energi laut di perairan Lampung dengan Delft3D. Meski demikian, penelitian-penelitian tersebut berfokus pada wilayah berbeda, dengan kondisi oseanografi dan resolusi data yang tidak sama, serta tidak secara langsung menyoroti kasus kerusakan infrastruktur akibat gelombang ekstrem. Selain itu, penelitian ini dilengkapi dengan proses validasi menggunakan data pasang surut observasi AWS di Pantai Kijing, yang menjadi pembeda penting dibandingkan studi sebelumnya.

Penelitian ini berfokus pada pemodelan gelombang di Pantai Kijing dengan pendekatan komputasi dinamika fluida melalui perangkat lunak Delft3D. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan data pasang surut, angin, tekanan permukaan, dan batimetri untuk merepresentasikan kondisi lokal secara lebih detail. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik gelombang di sekitar Pantai Kijing, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam mitigasi bencana pesisir, perencanaan infrastruktur pelabuhan, serta peningkatan keselamatan aktivitas maritim.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di Stasiun Maritim Pontianak pada bulan Agustus sampai dengan bulan Desember2023. Lokasi penelitian berada di wilayah Pantai Kijing, Kecamatan Sungai Kunyit, Kabupaten Mempawah yang berada antara 0,413°-0,574° lintang utara (LU) dan 108,94°-108,79° bujur timur (BT). Luas daerah inimencapai 20 hektar. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode numerik (*Finite Difference*) dengan pendekatan komputasi dinamika fluida menggunakan *software* Delft3D. Input data penelitian adalah informasi, data, atau bahan yang digunakan sebagai dasar atau sumber untuk melakukan suatu studi atau penelitian ilmiah. Input data ini membentuk dasar untuk analisis, interpretasi, dan penarikan kesimpulan dalam penelitian. Adapun input data yang digunakan pada penelitian untuk menghasilkan simulasi model gelombang signifikan pada kasus jembatan dermaga Pantai Kijing roboh ini berupa data sekunder yaitu komponen pasang surut, tekanan permukaan dan komponen angin u dan v, serta data batimetri.

Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya yaitu Komponen pasang surut, Tekanan permukaan dan komponen angin u dan v, Data batimetri, Data observasi pasang surut, Data reanalisis model gelombang signifikan dan angin di wilayah Pantai Kijing, Kabupaten Mempawah.

Proses Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dilakukan sebagai berikut:

1. Data angin dan tekanan diolah menggunakan perangkat lunak Python,

bersumber dari ECMWF ERA5 dengan resolusi 0,25° × 0,25°.
2. Data batimetri wilayah Pantai Kijing diperoleh dari GEBCO dengan resolusi 500 × 500 m, digunakan untuk pembuatan kedalaman area dan penentuan syarat batas model.
3. Data komponen pasang surut diolah menggunakan Tide Model Driver (TMD) dengan input data pasang surut global TPXO 08 (Egbert & Erofeeva, 2022). Resolusi yang digunakan adalah 1/6°, sehingga diperoleh komponen harmonik M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, dan Q1.
4. Data pasang surut tahun 2023 dari Automatic Weather Station (AWS) Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak digunakan sebagai data validasi.
5. Data model gelombang dan data angin dari Ocean Forecast System (OFS) BMKG Pontianak digunakan sebagai data analisis pembanding.

Konfigurasi Model

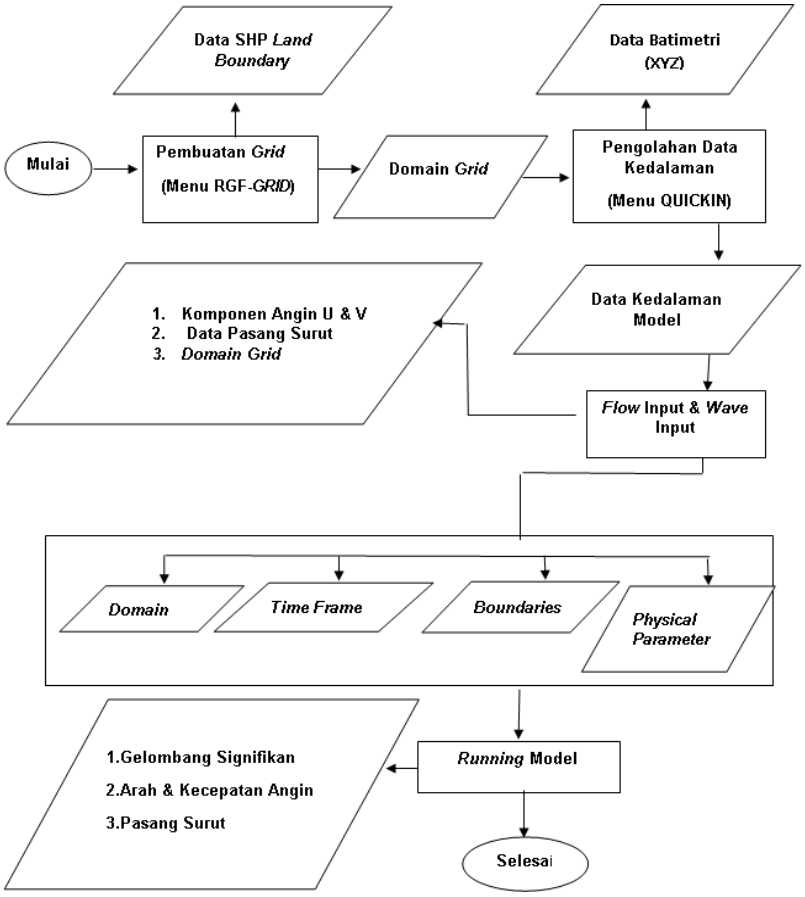
Pembuatan domain simulasi dilakukan melalui Delft3D-RGFGRID dengan tiga jenis grid beresolusi berbeda. Data batimetri dimasukkan melalui Delft3D-QUICKIN, kemudian diatur dalam Delft3D-FLOW dengan menginput data grid (domain), kedalaman, komponen pasang surut, serta komponen angin u dan v. Simulasi dijalankan selama tiga hari, yaitu 13–15 Juli 2021, dengan puncak kejadian pada 14 Juli 2021.

Verifikasi Model

Verifikasi dilakukan dengan menghitung nilai Mean Absolute Error (MAE) (Indiani *et al.,* 2018):

$$MAE\ \frac{1}{n}\sum_{i}^{n} = 1|Yi - \overline{Yi}| \quad \text{..... (1)}$$

dengan n adalah jumlah data, Yi adalah data tinggi gelombang validasi, dan $\overline{Yi}$ adalah data tinggi gelombang hasil pemodelan. Klasifikasi nilai MAE (Indiani et al., 2018) ditunjukkan pada **Tabel 1**. Sedangkan Tahapan dalam konfigurasi model ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. *Flowchart* pemodelan

Tabel 1. Klasifikasi nilai MAE

MAE	Tingkat Kesalahan
0,00 – 0,299	Kecil
0,30 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,899	Besar
> 0,9	Sangat Besar

Pada proses verifikasi, model juga mempertimbangkan nilai dari koefisien korelasi dari perbandingan pola grafik antara data model dan data observasi. Analisis koefisien korelasi dihitung menggunakan persamaan 2 sebagai berikut (Arrokhman *et al.,* 2021).

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum xy)(\sum xy)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2 (n(\sum y)^2 - (\sum xy)^2)}} \quad \text{... (2)}$$

dengan variabel x adalah data hasil simulasi, y adalah data observasi, n adalah banyaknya data, dan r adalah koefisien korelasi dari x terhadap y. Kemudian Kriteria interpretasi koefisien korelasi ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Kriteria koefisien korelasi

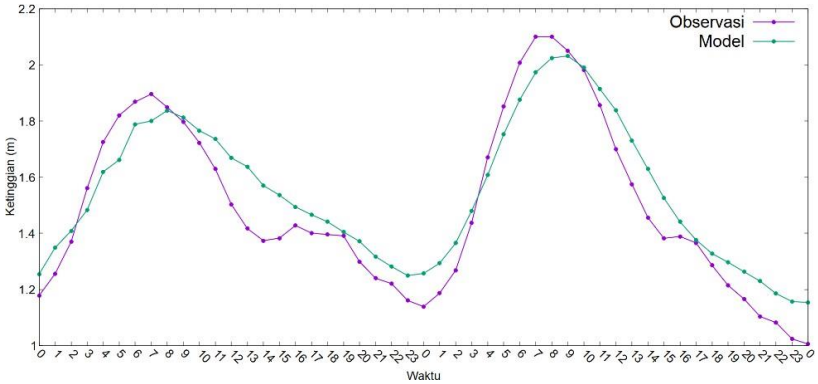
R	Interpretasi
0,90 – 1,00	Sangat kuat
0,70 – 0,89	Tinggi
0,50 – 0,69	Sedang
0,30 – 0,49	Rendah
0,00 – 0,29	Sangat rendah

HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi Validasi

Validasi model dilakukan dengan mempertimbangkan nilai koefisien korelasi dari grafik perbandingan antara hasil simulasi dan data observasi, serta menghitung nilai kesalahan rata-rata absolut (MAE). Pada **Gambar 2**, grafik perbandingan menunjukkan bahwa pola pasang surut hasil model Delft3D mendekati pola data *Automatic Weather Station* (AWS) dari Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak. Nilai koefisien korelasi sebesar 0,96 termasuk kategori sangat kuat (Arrokhman *et al.,* 2021), sementara nilai MAE sebesar 0,089 tergolong kecil (Indiani *et al.,* 2018).

Pemilihan pasang surut sebagai acuan validasi beralasan karena pasang surut merupakan parameter fisis penting dalam pemodelan, yaitu sebagai syarat batas. Hal ini sejalan dengan penelitian Hasanah (2017) yang memanfaatkan pasang surut sebagai parameter validasi, serta Rakhmawati (2019) yang mengintegrasikannya dalam pemodelan menggunakan Delft3D. Dengan demikian, hasil validasi ini menegaskan bahwa model yang digunakan cukup andal untuk dianalisis lebih lanjut.

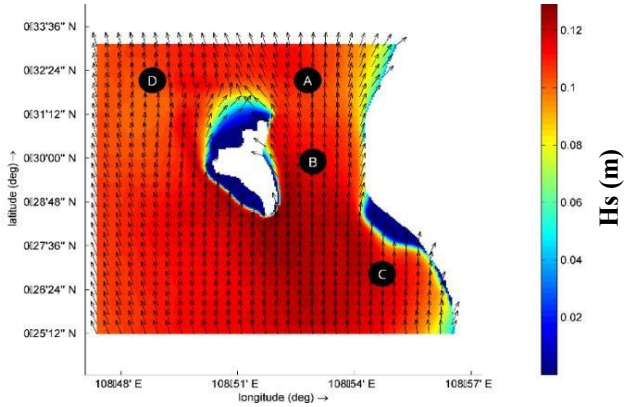


Gambar 2. Grafik perbandingan pasang surut model dan observasi

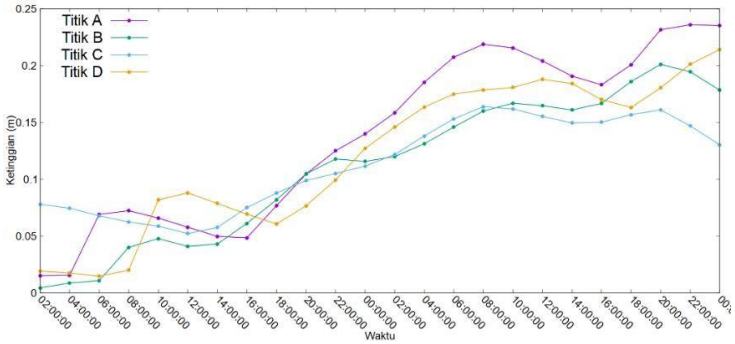
Analisis Gelombang Model Delft3D

Pemodelan gelombang menggunakan Delft3D menghasilkan grafik hubungan waktu terhadap tinggi gelombang signifikan di empat titik pengamatan sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**. Pada titik A, tinggi gelombang meningkat hingga 0,07 m dalam 4 jam pertama, menurun ke 0,04 m pada jam ke-14, lalu bertahap naik hingga maksimum 0,21 m pada jam ke-31. Titik B memperlihatkan kenaikan lebih lambat, hanya 0,04 m pada 8 jam pertama, turun ke 0,03 m pada jam ke-13, dan meningkat hingga 0,20 m pada jam ke-41.

Titik C mengalami kenaikan awal 0,08 m, kemudian menurun ke 0,05 m sebelum naik lagi hingga 0,16 m. Sementara titik D naik ke 0,08 m pada jam ke-12, turun ke 0,06 m, dan meningkat hingga 0,18 m pada jam ke-38.



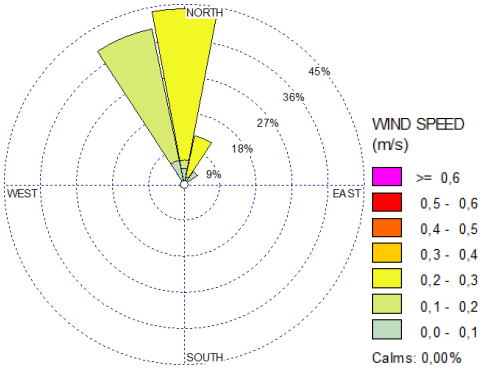
Gambar 3. Titik pengamatan gelombang model Delft3D



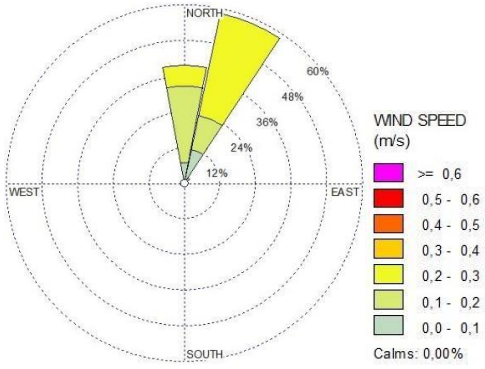
Gambar 4. Grafik ketinggian gelombang untuk titik A - D

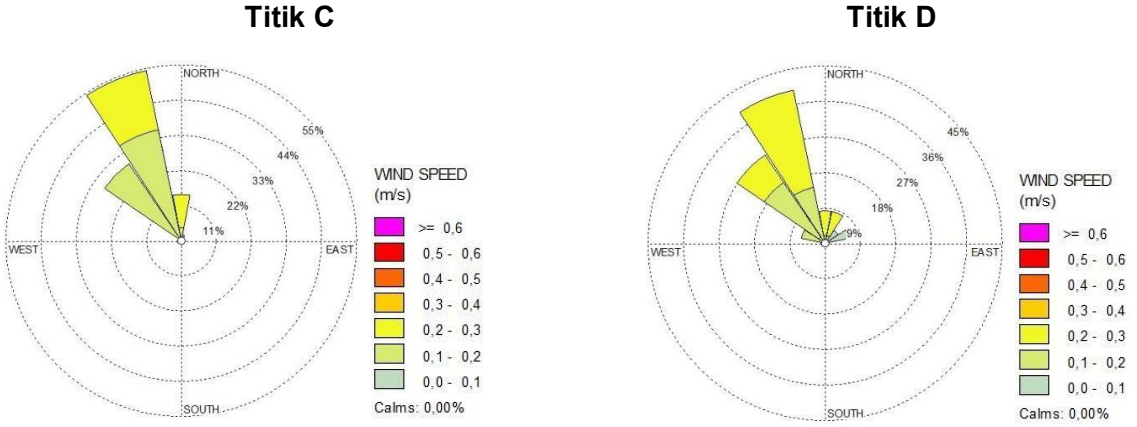
Arah penjalaran gelombang ditunjukkan dalam **Gambar 5**, yang memperlihatkan arah dominan ke barat laut dan utara pada titik A, ke utara dan timur laut pada titik B, ke barat laut pada titik C, serta ke barat laut pada titik D. Secara umum, arah penjalaran gelombang dominan dari selatan menuju barat laut, utara, dan timur laut. Berdasarkan klasifikasi skala Beaufort, tinggi gelombang yang diperoleh masih tergolong rendah (Aji & Cahyadi, 2015). Kondisi ini dapat dijelaskan melalui fenomena fisis. Keberadaan pulau kecil di depan Pantai Kijing menyebabkan terjadinya difraksi gelombang, yaitu penyebaran energi gelombang ke sisi pulau (Ikhsanudin *et al.,* 2017). Pulau ini berperan sebagai pelindung alami dengan efek bayangan (*shadow effect*) yang meredam energi gelombang (Ali *et al.,* 2022). Selain itu, transformasi gelombang akibat pendangkalan, pantulan, difraksi, dan refleksi sebelum pecah di pantai turut memengaruhi variasi ketinggian gelombang (Wahyulia *et al.,* 2023). Dengan demikian, hasil simulasi yang menunjukkan kategori gelombang rendah dapat dipahami sebagai konsekuensi dari faktor topografi dan proses transformasi gelombang lokal.

Titik A



Titik B

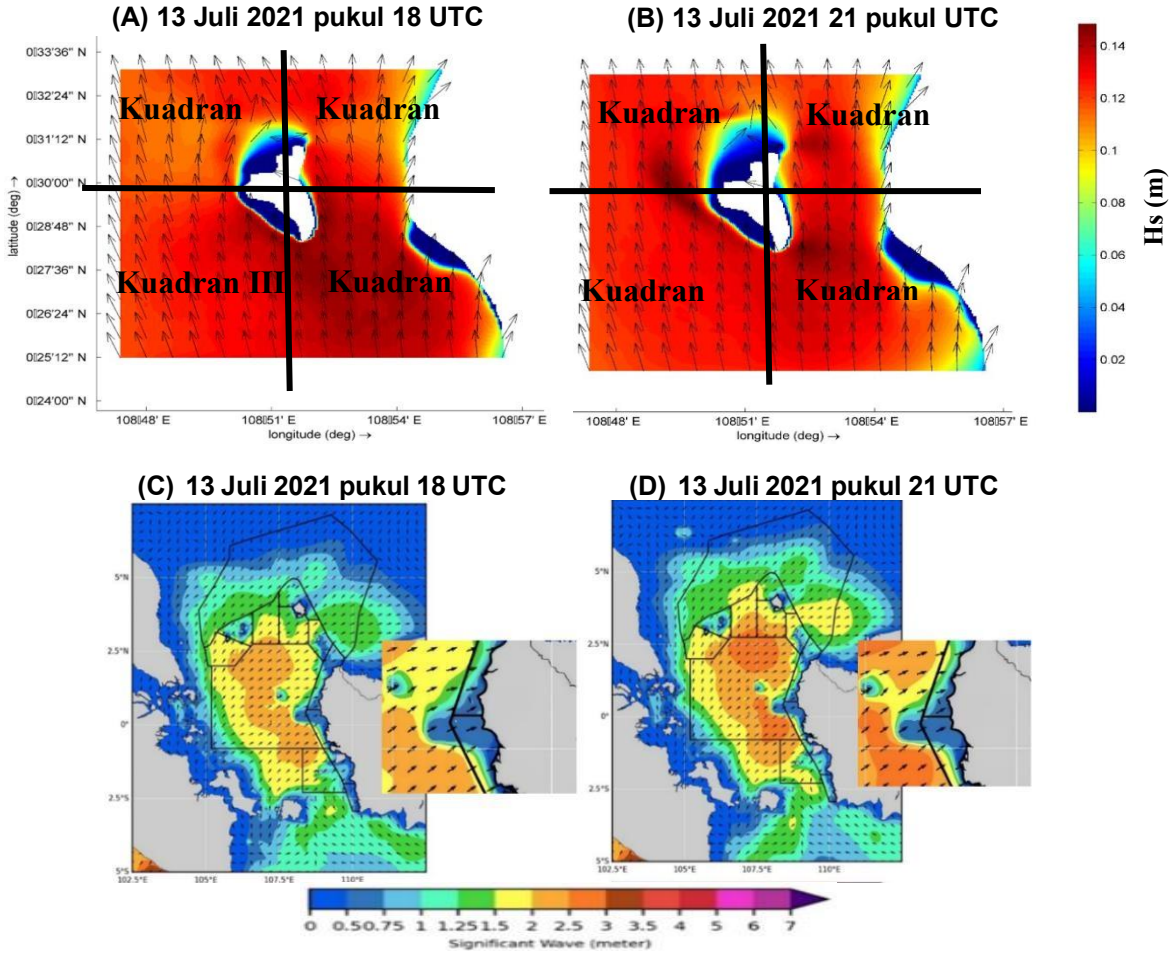




Gambar 5. *Windrose* arah penjalaran gelombang untuk titik A - D

Komparasi Gelombang Model Delft3D dengan Gelombang Model *Ocean Forecast System* (OFS)BMKG

Hasil perbandingan ditunjukkan pada **Gambar 6A–6D**. Simulasi Delft3D pukul 18 UTC (**Gambar 6A**) menunjukkan nilai maksimum sekitar 0,10–0,12 m dengan distribusi dominan di kuadran III dan IV. Pada pukul 21 UTC (**Gambar 6B**), nilai maksimum sedikit meningkat menjadi 0,12–0,14 m pada kuadran II–IV. Sebaliknya, simulasi OFS BMKG pukul 18 UTC dan 21 UTC (**Gambar 6C** dan **6D**) menunjukkan gelombang signifikan jauh lebih tinggi, mencapai 0,75–1,0 m.



Gambar 6. Komparasi gelombang model Delft3D dengan gelombangmodel *Ocean Forecast System* (OFS) BMKG

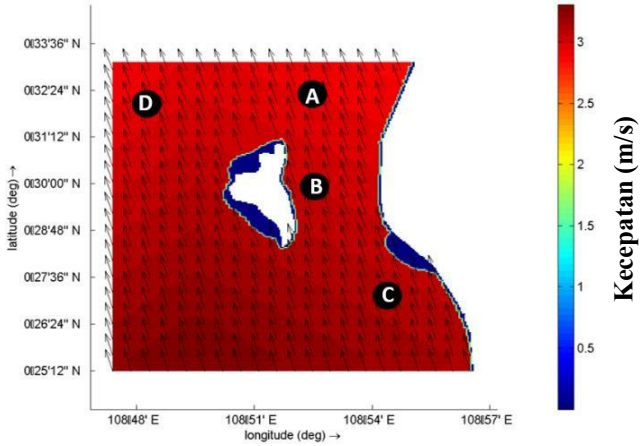
Meskipun terdapat perbedaan besar pada tinggi gelombang, arah penjalaran pada kedua model relatif konsisten, yaitu dari selatan menuju barat laut, utara, dan timur laut. Hal ini

sejalan dengan mekanisme pembangkitan gelombang oleh angin, di mana energi angin ditransfer ke permukaan laut (Wahyulia *et al.,* 2023). Kejadian pada Juli 2021 bertepatan dengan musim timur, saat angin bertiup dari Australia menuju Asia (Fadika Ulha *et al.,* 2014).

Perbedaan ketinggian gelombang antara Delft3D dan OFS BMKG dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. OFS BMKG menggunakan data angin WRF-HIRES dengan dukungan High Performance Computing (HPC), sehingga mampu merepresentasikan variabilitas lokal dengan detail lebih tinggi. Sebaliknya, Delft3D menggunakan input angin ERA5 global dengan resolusi spasial 0,25° dan interval temporal 1 jam. Resolusi ini lebih kasar sehingga peristiwa ekstrem singkat dapat hilang akibat interpolasi data (Kurnia *et al.,* 2020). Hal tersebut menjadikan hasil Delft3D cenderung underestimate dibanding OFS BMKG (Qalbi *et al.,* 2017). Perbedaan konfigurasi model juga turut berpengaruh.

Komparasi Parameter Angin Model Delft3D dengan Angin Model *Ocean Forecast System* (OFS) BMKG terhadap Ketinggian Gelombang yang Dihasilkan

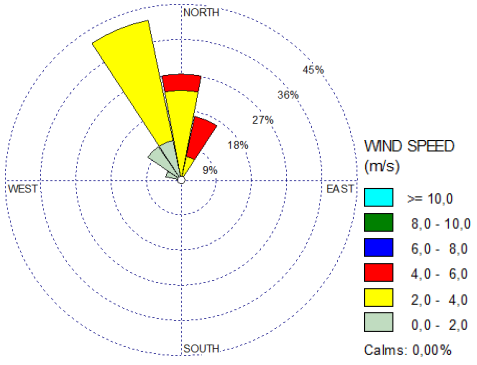
Analisis parameter angin dilakukan untuk memahami lebih jauh penyebab perbedaan tinggi gelombang antara model Delft3D dan OFS BMKG. Lokasi titik pengamatan angin diperlihatkan pada **Gambar 7**. Titik-titik ini dipilih untuk mewakili variasi spasial di sekitar Pantai Kijing, sehingga dapat diketahui sejauh mana distribusi arah dan kecepatan angin berkontribusi terhadap perbedaan tinggi gelombang yang dihasilkan kedua model.



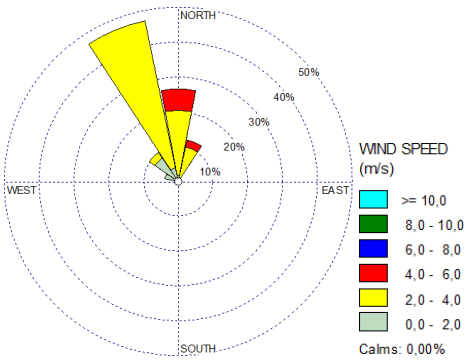
Gambar 7. Titik pengamatan angin model Delft3D

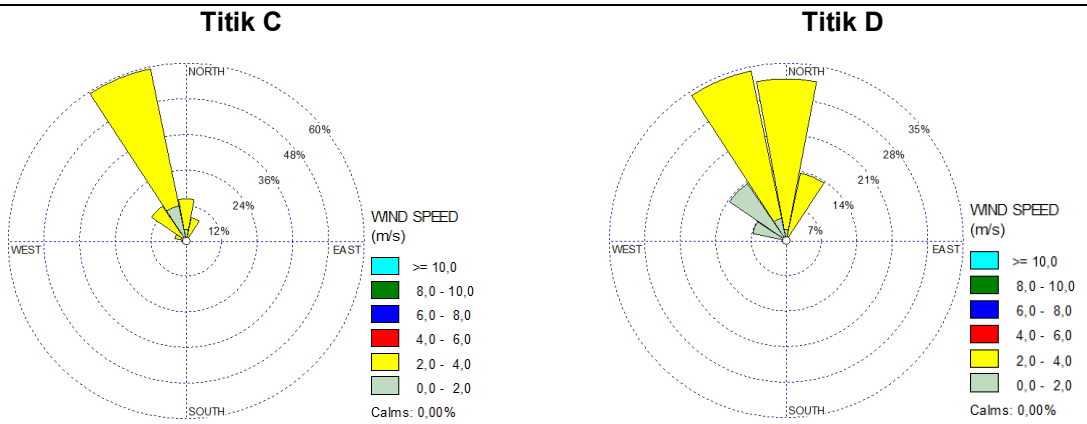
Arah angin yang dihasilkan oleh Delft3D divisualisasikan dalam bentuk windrose pada Gambar 8. Pola ini menunjukkan bahwa di semua titik pengamatan, arah dominan angin bergerak ke barat laut dan utara. Hal ini konsisten dengan kondisi musim timur, ketika angin bertiup dari benua Australia menuju Asia (Fadika Ulha *et al.,* 2014). Kesesuaian pola arah ini mengindikasikan bahwa meskipun nilai kecepatan angin pada Delft3D relatif lebih rendah, model tetap mampu merepresentasikan pola musiman yang memengaruhi dinamika gelombang di perairan Pantai Kijing. Dengan demikian, secara arah, kedua model menunjukkan konsistensi yang kuat.

Titik A



Titik B



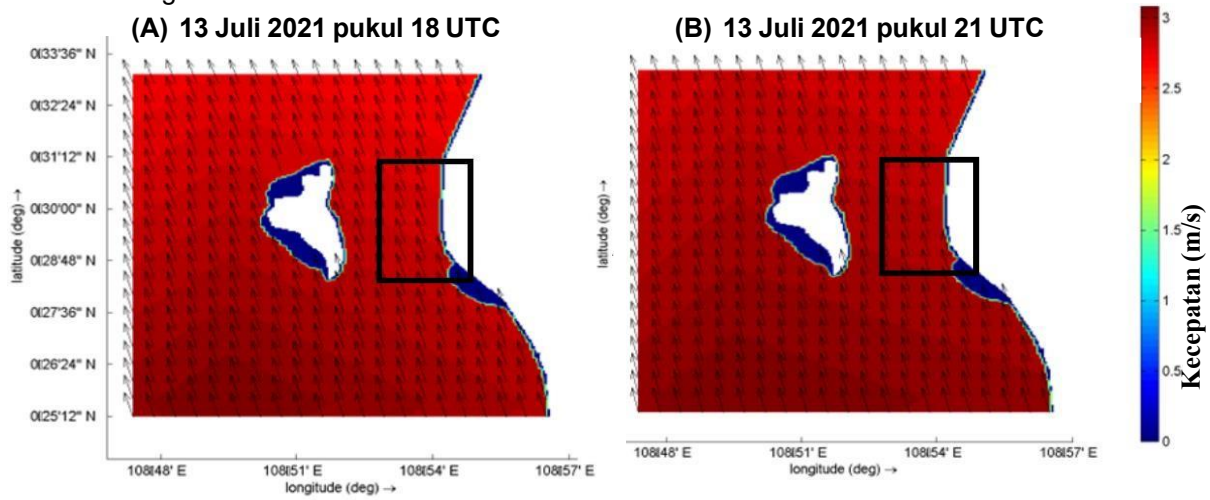


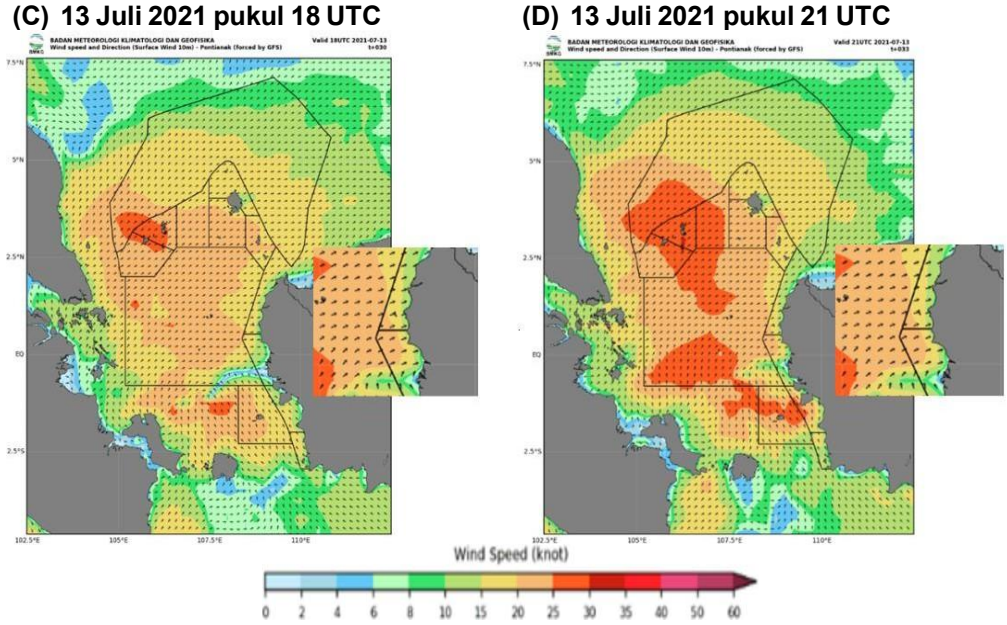
Gambar 8. *Windrose* arah dan kecepatan angin untuk titik A - D

Kecepatan angin hasil pemodelan diperlihatkan pada **Gambar 9A–9D**. Pada model Delft3D (**Gambar 9A** dan **9B**), kecepatan angin relatif rendah, berkisar antara 1,5–3 m/s. Distribusi spasialnya juga lebih homogen, dengan sedikit variasi antar titik. Sebaliknya, pada model OFS BMKG (**Gambar 9C** dan **9D**), kecepatan angin jauh lebih tinggi, mencapai 5,1–7 m/s (10–15 knots). Selain lebih besar, distribusi spasial angin pada model BMKG juga lebih bervariasi, menunjukkan adanya perbedaan intensitas di beberapa kuadran. Perbedaan signifikan ini menjelaskan hasil perbedaan tinggi gelombang: angin yang lebih lemah dalam model Delft3D membangkitkan gelombang rendah (0,1–0,2 m), sedangkan angin yang lebih kuat pada OFS BMKG membangkitkan gelombang yang lebih tinggi (0,75–1,0 m).

Selain itu, pola kecepatan angin yang lebih homogen pada Delft3D juga mencerminkan keterbatasan resolusi data ERA5 (0,25°) yang digunakan sebagai input. Proses interpolasi data reanalisis dapat menghaluskan variasi lokal, sehingga kejadian ekstrem singkat atau intensifikasi angin di area tertentu tidak terekam (Kurnia *et al.,* 2020). Sebaliknya, OFS BMKG menggunakan input WRF-HIRES beresolusi lebih tinggi dengan dukungan HPC, yang mampu menangkap variabilitas spasial dan temporal secara lebih detail, termasuk kejadian angin kencang sesaat. Temuan ini konsisten dengan hasil gelombang: OFS BMKG cenderung menghasilkan tinggi gelombang yang lebih realistis pada kondisi ekstrem, sedangkan Delft3D cenderung underestimate (Qalbi *et al.,* 2017).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemodelan Delft3D cukup andal dalam merepresentasikan dinamika gelombang di Pantai Kijing, dengan validasi kuat terhadap data observasi. Gelombang signifikan yang relatif rendah (0,03–0,21 m) dijelaskan oleh faktor fisis seperti difraksi dan *shadow effect* pulau kecil serta transformasi gelombang di perairan dangkal. Dibandingkan OFS BMKG, ketinggian gelombang Delft3D lebih rendah karena perbedaan resolusi data input dan konfigurasi model, meskipun arah penjalaran gelombang konsisten.





Gambar 9. Komparasi angin model Delft3D dengan gelombangmodel *Ocean Forecast System* (OFS) BMKG

Analisis angin memperkuat hal ini, di mana kecepatan angin yang lebih rendah pada Delft3D membangkitkan gelombang lebih kecil, sedangkan OFS BMKG menghasilkan nilai lebih tinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan data dan konfigurasi model, serta memberi implikasi praktis bagi mitigasi bencana dan perencanaan infrastruktur pelabuhan yang lebih adaptif terhadap dinamika gelombang lokal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemodelan gelombang telah berhasil dilakukan dengan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan Delft3D, yang divalidasi dengan data pasang surut dari Automatic Weather Station (AWS) Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak. Validasi menunjukkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,089 yang termasuk kategori kecil, dan koefisien korelasi sebesar 0,96 yang masuk kategori sangat kuat. Analisis pada titik sampling dan model spasial menunjukkan tinggi gelombang di sekitar Pelabuhan Kijing berkisar 0,03–0,21 m dengan arah dominan bergerak dari selatan menuju barat laut, utara, dan timur laut pada periode 13–15 Juli 2021. Namun demikian, pemodelan dengan Delft3D menghasilkan nilai tinggi gelombang yang cenderung underestimate dibanding data reanalisis model OFS BMKG. Perbedaan ini dipengaruhi oleh perbedaan resolusi data input serta konfigurasi model yang digunakan. Pada penelitian ini, data input angin diperoleh dari ECMWF, sehingga diharapkan penelitian ke depan dapat menggunakan data angin dari citra satelit atau data primer hasil pengukuran lapangan agar ketelitian meningkat. Selain itu, untuk pemodelan gelombang dengan Delft3D diperlukan pengaturan yang lebih detail pada parameter wave input agar hasil lebih representatif. Implikasi praktis dari penelitian ini penting bagi mitigasi bencana dan perencanaan infrastruktur pesisir. Kasus robohnya jalan penghubung dermaga Pelabuhan Kijing pada Juli 2021 menjadi bukti nyata kerentanan infrastruktur terhadap kombinasi angin, gelombang, dan kondisi cuaca ekstrem. Dengan mengetahui karakteristik arah dan tinggi gelombang di sekitar Pantai Kijing, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam merancang struktur pelabuhan, dermaga, maupun proteksi pantai yang lebih adaptif terhadap dinamika gelombang lokal. Selain itu, informasi tentang peran pulau kecil sebagai peredam alami (wave barrier) dapat dimanfaatkan dalam tata ruang pesisir, misalnya dengan menjaga keberadaan pulau-pulau kecil dan ekosistem sekitarnya sebagai benteng alami. Dengan demikian, hasil kajian ini tidak hanya bermanfaat untuk pengembangan ilmu, tetapi juga memberi kontribusi langsung bagi upaya mitigasi bencana pesisir dan peningkatan keselamatan aktivitas pelayaran di Kalimantan Barat.

DAFTAR PUSTAKA

Aji, I. M. L., & Cahyadi, A. (2015). Analisis arah dan kecepatan angin menggunakan data observasi dan satelit. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 16*(1), 27–

36.

Ali, I. A. H. A., Armono, H. D., Rahmawati, S., Ridlwan, A., & Ariefianto, R. M. (2022). Pemodelan tinggi gelombang untuk kajian energi gelombang laut di perairan barat Provinsi Lampung dengan software Delft3D. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim, 15*(2), 75–84. https://doi.org/10.29122/jurnalwave.v15i2.4958

Arrokhman, N. A., Wahyuni, S., & Suhartanto, E. (2021). Evaluasi kesesuaian data satelit untuk curah hujan dan evaporasi terhadap data pengukuran di Kawasan Waduk Sutami. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air, 1*(2), 904–916. https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2021.001.02.46

Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19*(2), 183–204. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019%3C0183:EIMOBO%3E2.0.CO;2

Fadika, U., Rifai, A., & Rochaddi, B. (2014). Arah dan kecepatan angin musiman serta kaitannya dengan sebaran suhu permukaan laut di selatan pangandaran jawa barat. *Journal of Oceanography*, *3*(3), 429-437.

Fauzan, B. C., Atmodjo, W., Rochaddi, B., Widiaratih, R., & Rifai, A. (2021). Studi run-up gelombang pada bangunan jetty Pelabuhan Tegalsari, Kota Tegal. *Indonesian Journal of Oceanography, 3*(3), 271–279. DOI: https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i3.11593

Habibie, M. N., Priyono, A., & Setiawan, A. (2013). Studi kerentanan pantai akibat abrasi dengan pendekatan model numerik. *Jurnal Kelautan Tropis, 16*(1), 45–52.

Hasanah, U. (2017). Validasi pemodelan gelombang laut menggunakan parameter fisis. *Jurnal Kelautan, 10*(2), 97–105.

Ikhsanudin, M., Sulaiman, A., & Hidayat, R. (2017). Kajian efek pulau kecil terhadap penyebaran gelombang laut di perairan pesisir. *Jurnal Ilmu Kelautan, 22*(3), 115–124.

Indiani, P., Jasin, P. M. I., & Halim, F. (2018). Analisis karakteristik gelombang di Teluk Amurang Kabupaten Minahasa Selatan. *Jurnal Sipil Statik, 6*(8), 559–568.

Kurnia, R., Sugianto, D. N., & Hadi, S. (2020). Analisis data reanalisis ERA5 untuk pemodelan oseanografi di perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 21*(1), 1–12.

Liufandy, F., Santoso, A., & Wibowo, T. (2022). Simulasi numerik dampak angin saat badai George dan Jacob terhadap tinggi gelombang signifikan di Laut Selatan Jawa. *Jurnal Kelautan Nusantara, 11*(2), 67–76.

Mustafa, A. (2017). Simulasi gelombang akibat angin di Pantai Puger Jember dengan software Delft3D. *Jurnal Kelautan, 10*(1), 33–41.

Prima Aris Wardhani, D., Nugroho, S. H., & Prasetyo, A. D. (2021). Variasi tinggi gelombang laut di Indonesia terkait siklus musiman. *Jurnal Meteorologi dan Oseanografi, 12*(2), 99–110.

Qalbi, H., Hadi, S., & Sugianto, D. N. (2017). Perbandingan hasil model gelombang dengan data observasi di perairan selatan Jawa. *Jurnal Ilmu Kelautan, 22*(1), 55–63.

Rafiuddin, R., Supriyadi, S., & Wibowo, A. (2018). Pemodelan gelombang laut di selatan Jawa menggunakan SWAN. *Jurnal Oseanografi, 7*(1), 22–31.

Rakhmawati, D. (2019). Pemodelan morfologi pantai dengan Delft3D di Pantai Glagah. *Jurnal Kelautan, 12*(2), 101–109.

Roem, E., Wibowo, A., & Rasyid, M. (2015). Prediksi gelombang laut menggunakan data vektor angin di perairan Tarakan. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 16*(2), 45–56.

Saad, M., Munir, A., & Wibowo, T. (2021). Analisis dampak gelombang laut tinggi terhadap keselamatan transportasi laut. *Jurnal Transportasi Laut, 9*(2), 127–134.

Sari, R., & Fahrezy, R. (2023). Peran angin sebagai faktor utama pembangkit gelombang di perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi Tropis, 5*(1), 15–25.

Wahyulia, R., Anwar, M., & Pratama, R. (2023). Transformasi gelombang di perairan dangkal dan implikasinya terhadap desain pelindung pantai. *Jurnal Rekayasa Pantai, 14*(1), 55–66.