

High Wave Events in The Java Sea to Support Maritime Transportation Safety

(Kejadian Gelombang Tinggi di Laut Jawa untuk Mendukung Keselamatan Transportasi Laut)

Triyono^{1*}, Wilhelmina Patty², Johnny Budiman², Rose O.S.E. Mantiri², Billy Th. Wagey², Revols D. Ch. Pamikiran², Deiske A. Sumilat², Usman Efendi³

1. Program Studi Ilmu Perairan, Pascasarjana, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara
2. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara
3. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

*Penulis Korespondensi : yonotri82@gmail.com

ABSTRACT

The Java Sea plays a strategic role in supporting maritime transportation and trade in Indonesia, particularly as a key connector between Java Island and surrounding regions. However, the high intensity of maritime activity in this area is accompanied by a significant risk of maritime accidents, often triggered by high waves and extreme weather conditions. This study aims to analyze the characteristics of high wave events in the Java Sea to support maritime safety and disaster risk mitigation, in accordance with the SOLAS (Safety of Life at Sea) international standards. The analysis utilizes numerical wave model data from Wavewatch III and wind speed data from the Semarang Maritime Meteorological Station for the period of 2004–2023. The results reveal a bimodal annual pattern, with two peaks and two troughs in both wave height and wind speed cycles. Monthly occurrences of high wave events are most frequent in January and August. Annual trend analysis shows an increase of 1–2 events per year for waves with heights of 1.25–1.5 meters, and 1–3 events per year for waves of 1.5–2.5 meters. Meanwhile, waves exceeding 2.5 meters exhibit either a constant trend or statistically insignificant changes. These findings are expected to contribute to the development of early warning systems and policy frameworks aimed at enhancing maritime safety in the Java Sea region.

Keywords: Java sea, high wave, wind speed, numerical model, SOLAS

ABSTRAK

Laut Jawa memiliki peran strategis dalam mendukung pelayaran dan perdagangan laut di Indonesia, khususnya sebagai penghubung utama Pulau Jawa dengan wilayah sekitarnya. Namun, tingginya intensitas aktivitas maritim di kawasan ini juga disertai dengan tingginya risiko kecelakaan laut, yang salah satunya dipicu oleh kondisi gelombang tinggi dan cuaca ekstrem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kejadian gelombang tinggi di Laut Jawa sebagai upaya mendukung keselamatan pelayaran dan mitigasi bencana maritim, sejalan dengan standar internasional SOLAS (Safety Of Life At Sea). Analisis dilakukan menggunakan data model numerik Wavewatch III serta data kecepatan angin dari Stasiun Meteorologi Maritim Semarang selama periode 2004–2023. Hasil menunjukkan adanya pola dua puncak maksimum dan dua minimum dalam siklus tahunan tinggi gelombang dan kecepatan angin. Kejadian gelombang tinggi bulanan tertinggi terjadi pada Januari dan Agustus. Tren tahunan memperlihatkan peningkatan kejadian gelombang dengan ketinggian 1,25–1,5 m sebanyak 1–2 kejadian per tahun, serta gelombang 1,5–2,5 m sebanyak 1–3 kejadian per tahun. Sementara itu, gelombang lebih dari 2,5 m menunjukkan tren yang cenderung konstan atau tidak signifikan secara statistik. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan sistem peringatan dini serta kebijakan keselamatan pelayaran di wilayah Laut Jawa.

Kata kunci: laut Jawa, gelombang tinggi, kecepatan angin, model numerik, SOLAS

PENDAHULUAN

Laut Jawa telah menjadi wilayah strategis bagi transportasi maritim sejak abad ke-19, berfungsi sebagai rute utama yang menghubungkan Pulau Jawa dengan daerah sekitarnya, menjadikannya salah satu jalur perairan yang paling sibuk di Indonesia. Gelombang laut, yang dipengaruhi oleh angin, adalah faktor utama yang memengaruhi aktivitas maritim. Gelombang tinggi akibat angin kencang atau cuaca buruk dapat menghambat pelayaran, meningkatkan risiko kecelakaan, dan menyebabkan kerugian ekonomi. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 30% kecelakaan kapal disebabkan oleh cuaca buruk, dengan Laut Jawa tercatat memiliki angka kecelakaan tertinggi di Indonesia selama periode 2018–2021, seringkali dipicu oleh gelombang tinggi (Zhang & Li, 2017; Sunardi *et al.*, 2024).

Model numerik gelombang seperti Wavewatch III, yang menggunakan prinsip fisika dan data meteorologi, menjadi alat penting untuk memprediksi kondisi gelombang di suatu wilayah (Thomas & Dwarakish, 2015). Penelitian global mengenai gelombang, seperti yang dilakukan oleh Laloue *et al.* (2024) dan C. Zheng *et al.* (2022), menunjukkan tren peningkatan tinggi gelombang di beberapa wilayah, namun penelitian tentang karakteristik gelombang tinggi khususnya di Laut Jawa masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kejadian gelombang tinggi di Laut Jawa selama periode 2004–2023 menggunakan model Wavewatch III, dengan fokus pada identifikasi pola bulanan dan tren tahunan.

Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung keselamatan transportasi laut serta perencanaan mitigasi risiko, sesuai dengan konvensi SOLAS dalam menghadapi gelombang ekstrem (Wibowo *et al.*, 2018).

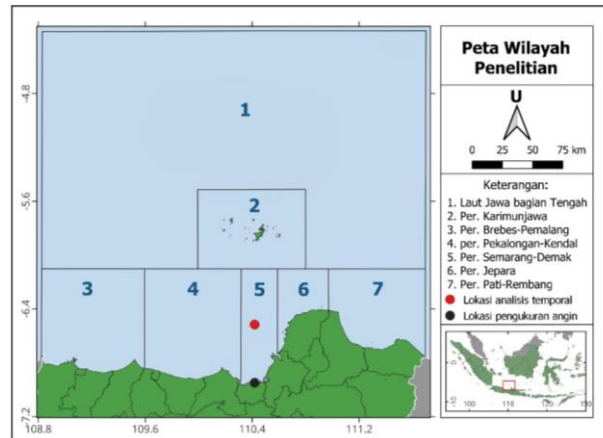
Pemahaman akan kondisi gelombang diketahui sebagai salah satu faktor penting dalam menentukan keselamatan aktivitas transportasi laut. Kajian yang lebih mendalam diperlukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik kondisi jumlah kejadian gelombang tinggi di Laut Jawa. Oleh karena itu, rumusan masalah yang diambil dalam penelitian ini adalah bagaimana karakteristik jumlah kejadian gelombang tinggi di Laut Jawa. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik temporal kecepatan angin dan tinggi gelombang bulanan di Perairan Semarang – Demak, menganalisis jumlah kejadian gelombang tinggi bulanan dan tren kejadian gelombang tahunan di Laut Jawa.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Waktu penelitian dari Desember 2024 hingga April 2025. Data yang digunakan selama 20 tahun, mulai dari 1 Januari 2004 hingga Desember 2023 untuk menganalisis klimatologi dan tren tinggi gelombang jangka Panjang (Laloue *et al.*, 2024).

Penelitian difokuskan di wilayah Laut Jawa, khususnya di Provinsi Jawa Tengah, dan dibagi menjadi 7 bagian untuk memudahkan analisis spasial. Lokasi-lokasi tersebut meliputi Laut Jawa bagian Tengah, Perairan Karimunjawa,



Gambar 1. Peta wilayah penelitian

Tabel 1. Daftar data penelitian

No.	Data	Sumber
1.	Data angin pengukuran Stasiun Meteorologi Maritim Semarang periode 1 Januari 2004 – 31 Desember 2023	BMKG
2.	Data arah dan tinggi gelombang signifikan model Wavewatch III periode 1 Januari 2004 – 31 Desember 2023	BMKG

Brebes-Pemalang, Pekalongan-Kendal (Gambar 1). Semarang-Demak, Jepara, dan Pati-Demak. Data angin diukur di Stasiun Meteorologi Maritim Semarang (ditandai titik hitam), sedangkan analisis temporal gelombang dilakukan di koordinat $110,42^{\circ}$ BT dan $6,52^{\circ}$ LS di perairan Semarang-Demak, karena letaknya paling dekat dengan lokasi pengukuran angin.

Materi Penelitian

Materi penelitian ini mencakup dua bagian utama, yaitu alat penelitian dan data penelitian. Alat-alat yang digunakan sebagian besar berbasis perangkat lunak open source, yang memungkinkan penggunaan bebas dan fleksibel. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri

dari dua jenis, yaitu data angin dan data gelombang (Tabel 1)..

Rancangan Penelitian

Data kecepatan angin dan tinggi gelombang dari model Wavewatch III di titik $110,42^{\circ}$ BT dan $6,95^{\circ}$ LS dianalisis secara temporal dengan interval 3 jam menggunakan Python. Data tinggi gelombang maksimum harian selama 20 tahun diklasifikasikan dalam empat kategori sesuai standar BMKG, seperti dilakukan oleh Muraleedharan *et al.* (2007). Jumlah kejadian tiap kategori dianalisis bulanan dan divisualisasikan dalam bentuk peta. Akumulasi tahunan digunakan untuk menghitung tren dengan regresi linear dan uji Wald ($\alpha = 5\%$), mengikuti metode Laloue *et al.* (2024).

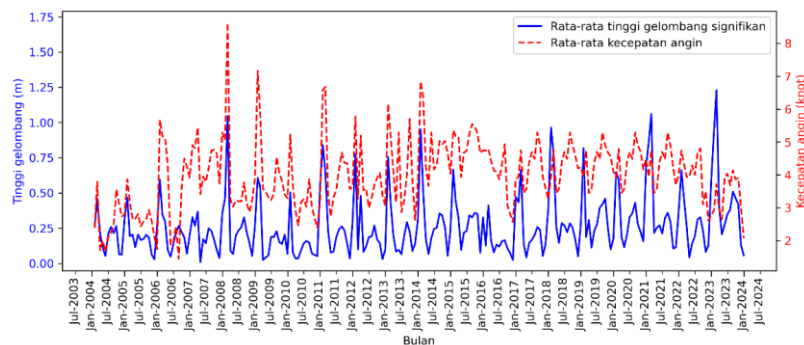
Model Analisis Data

Penelitian ini menganalisis data kecepatan angin dan tinggi gelombang secara temporal dan spasial. Analisis temporal menggunakan data deret waktu bulanan (rata-rata dan maksimum) untuk mengidentifikasi pola musiman dan ekstrem, dengan fokus khusus pada kecepatan angin sebagai faktor pembangkit gelombang. Analisis spasial dilakukan terhadap distribusi kejadian gelombang tinggi bulanan dan tren tahunannya untuk memahami variabilitas spasial dan temporal. Kejadian gelombang tinggi dikategorikan dalam empat kategori untuk mendukung analisis risiko terhadap berbagai jenis kapal.

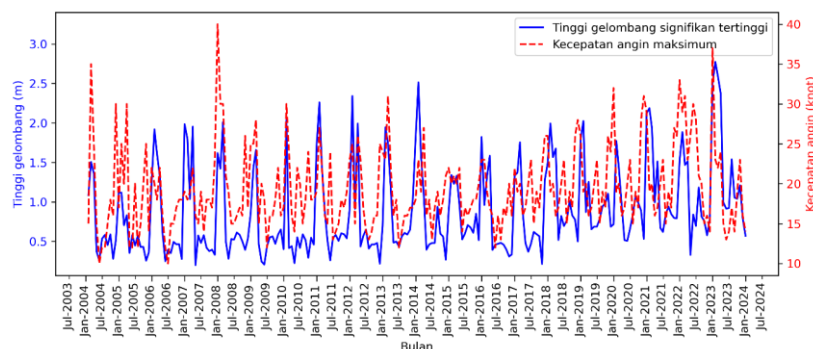
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Temporal Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang di Perairan Semarang – Demak

Grafik rata-rata bulanan menunjukkan bahwa kecepatan angin dan tinggi gelombang di perairan Semarang memiliki pola yang serupa antara tahun 2004 hingga 2023. Keduanya mengalami fluktuasi musiman, dengan puncak tertinggi terjadi pada Januari–Februari dan Juli–Agustus, serta nilai terendah pada Maret–April dan Oktober–November. Kecepatan angin rata-rata bulanan berkisar antara 4–9 knot, sedangkan tinggi gelombang rata-rata bulanan berkisar antara 0,1–1,2 meter. Pola ini



Gambar 2. Grafik rata-rata bulanan kecepatan angin di Stasiun Meteorologi Semarang dan rata-rata bulanan tinggi gelombang signifikan di perairan Semarang selama tahun 2004-2023



Gambar 3. Grafik nilai maksimum bulanan kecepatan angin di Stasiun Meteorologi Semarang dan maksimum bulanan tinggi gelombang signifikan di perairan Semarang selama tahun 2004-2023

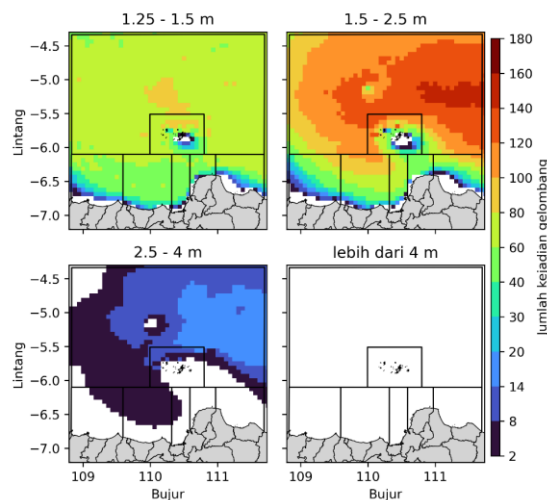
mencerminkan hubungan erat antara kecepatan angin dan tinggi gelombang di wilayah tersebut.

Kecepatan angin tertinggi tercatat pada Desember 2007, mencapai 40 knot, sedangkan tinggi gelombang tertinggi terjadi pada Januari 2023, mencapai 2,8 meter. Perbedaan waktu ini disebabkan oleh durasi angin bertiup yang berbeda, di mana tinggi gelombang dipengaruhi oleh kecepatan angin, durasi, dan jarak bertiupnya angin tanpa hambatan.

Analisis Jumlah Kejadian Gelombang Bulanan

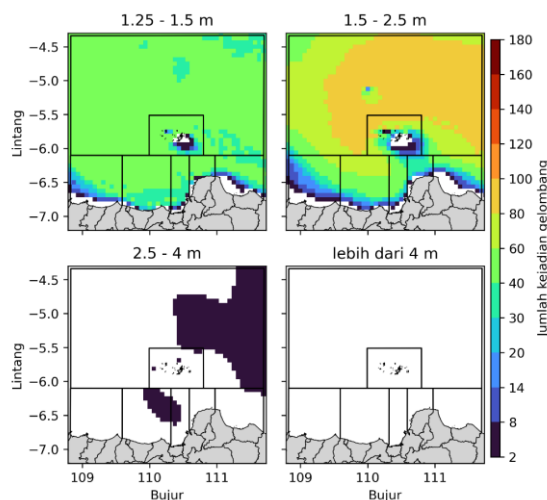
Sebaran spasial kejadian gelombang pada bulan Januari selama periode 2004–2023 menunjukkan bahwa gelombang dengan tinggi 1,5–2,5 meter merupakan yang paling dominan dan tersebar merata di seluruh wilayah perairan. Gelombang dengan tinggi 1,25–1,5 meter juga terjadi secara luas, sedangkan gelombang 2,5–4 meter tidak ditemukan di Perairan Jepara. Tidak terdapat kejadian gelombang

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Januari tahun 2004 - 2023



Gambar 4. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Januari tahun 2004 – 2023

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Februari tahun 2004 - 2023



Gambar 5. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Februari tahun 2004 – 2023

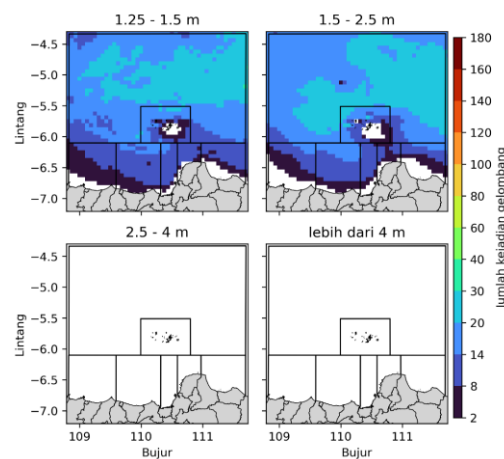
dengan tinggi di atas 4 meter selama periode tersebut.

Pada bulan Februari periode 2004–2023, jumlah kejadian gelombang cenderung menurun dibandingkan bulan Januari. Kejadian terbanyak terjadi pada gelombang setinggi 1,5–2,5 meter yang tersebar di seluruh wilayah perairan. Gelombang dengan tinggi 1,25–1,5 meter dan 2,5–4 meter juga tercatat, meskipun jumlahnya lebih sedikit dan tidak terjadi merata, terutama pada gelombang tinggi yang tidak teramati di Perairan Jepara. Tidak ditemukan gelombang dengan tinggi di atas 4 meter.

Pada bulan Maret dalam periode 2004 hingga 2023, frekuensi kejadian gelombang menurun dibandingkan Februari pada periode yang sama. Gelombang berketinggian 1,25–2,5 meter mendominasi di seluruh wilayah perairan dengan jumlah kejadian antara 2 hingga 30, sementara gelombang di atas 2,5 meter tidak tercatat.

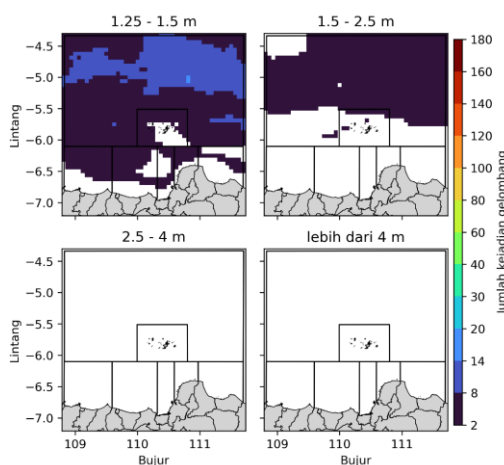
Pada April 2004–2023, jumlah kejadian gelombang mengalami penurunan dibandingkan Maret. Gelombang dengan tinggi 1,25–1,5 meter paling sering terjadi dan

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Maret tahun 2004 - 2023

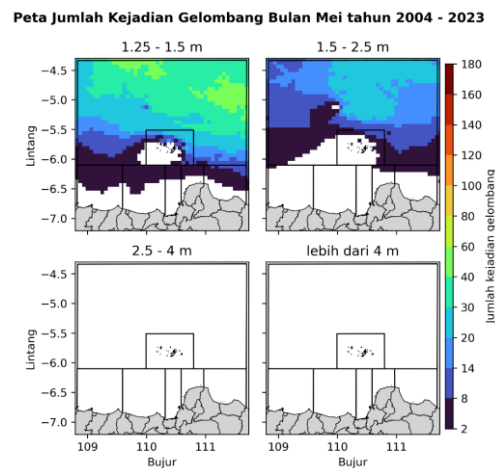


Gambar 6. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Maret tahun 2004 – 2023

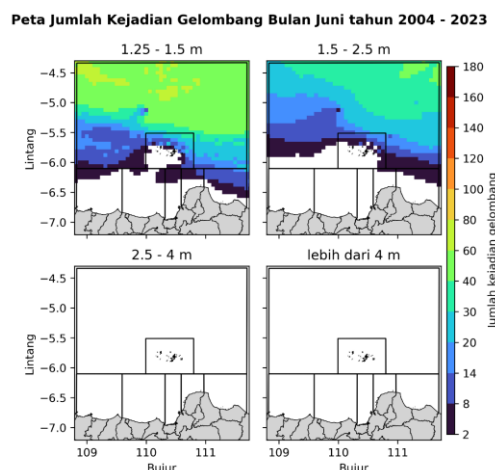
Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan April tahun 2004 - 2023



Gambar 7. Peta jumlah kejadian gelombang bulan April tahun 2004 – 2023



Gambar 8. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Mei tahun 2004 – 2023



Gambar 9. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Mei tahun 2004 – 2023

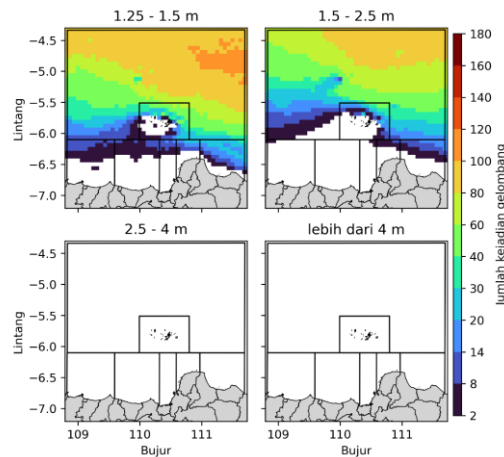
tersebar di seluruh perairan. Gelombang 1,5–2,5 meter hanya tercatat di Laut Jawa bagian tengah dan perairan Karimunjawa. Tidak ditemukan kejadian gelombang di atas 2,5 meter.

Gambar 8 menunjukkan bahwa jumlah kejadian gelombang pada bulan Mei 2004–2023 mengalami peningkatan dibandingkan bulan April pada periode yang sama. Kejadian paling dominan terjadi pada gelombang setinggi 1,25–2,5 meter di semua wilayah perairan kecuali perairan Pekalongan–Kendal dan Semarang–Demak. Gelombang dengan

ketinggian di atas 2,5 meter tidak tercatat selama periode pengamatan.

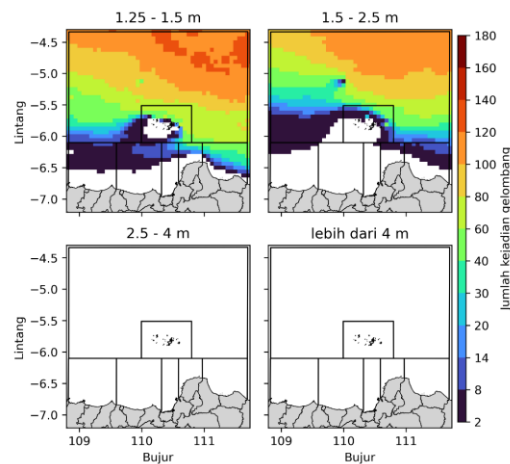
Pada bulan Juni selama periode 2004–2023, frekuensi kejadian gelombang meningkat dibandingkan bulan Mei. Gelombang paling sering terjadi pada kategori tinggi 1,25–1,5 meter dan tersebar luas di seluruh perairan. Gelombang setinggi 1,5–2,5 meter juga umum terjadi, kecuali di perairan Pekalongan–Kendal dan Semarang–Demak. Tidak ditemukan gelombang dengan tinggi lebih dari 2,5 meter dalam periode tersebut.

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Juli tahun 2004 - 2023



Gambar 10. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Juli tahun 2004 – 2023

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Agustus tahun 2004 - 2023



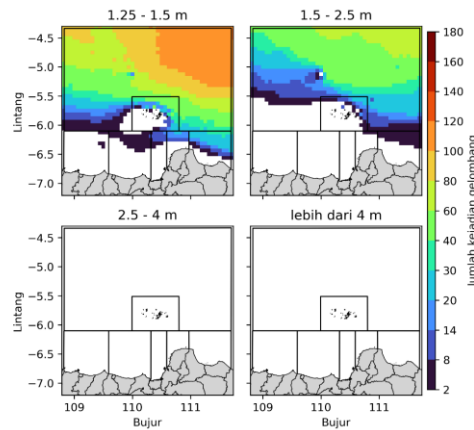
Gambar 11. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Agustus tahun 2004 – 2023

Gambar 10 menunjukkan bahwa pada Juli 2004–2023 terjadi peningkatan jumlah kejadian gelombang dibandingkan Juni pada periode yang sama. Kejadian paling banyak tercatat pada gelombang setinggi 1,25–1,5 meter dengan sebaran luas di seluruh wilayah perairan. Gelombang setinggi 1,5–2,5 meter juga terjadi secara merata, meskipun dengan frekuensi lebih rendah. Gelombang dengan ketinggian diatas 2,5 meter tidak

tercatat selama periode tersebut

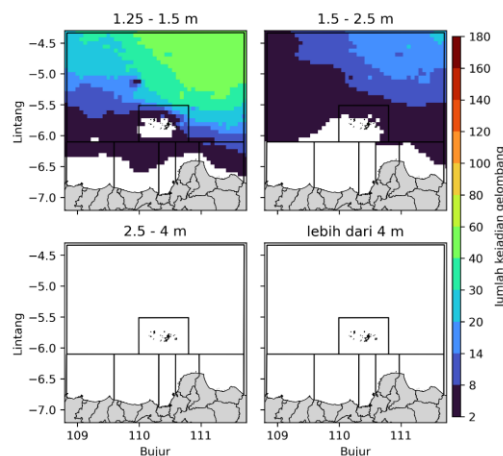
Pada bulan Agustus 2004–2023, jumlah kejadian gelombang menunjukkan peningkatan dibandingkan bulan Juli. Gelombang paling sering terjadi memiliki tinggi 1,25–1,5 meter dengan sebaran merata di seluruh wilayah perairan, diikuti oleh gelombang setinggi 1,5–2,5 meter yang juga tersebar luas. Tidak ditemukan kejadian gelombang dengan tinggi di atas 2,5 meter selama periode tersebut.

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan September tahun 2004 - 2023



Gambar 12. Peta jumlah kejadian gelombang bulan September tahun 2004 – 2023

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Oktober tahun 2004 - 2023



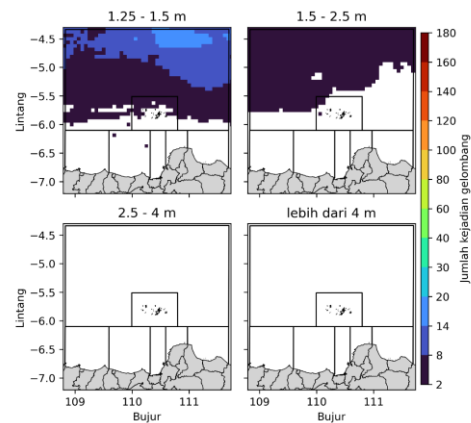
Gambar 13. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Oktober tahun 2004 – 2023

Gambar 12 menunjukkan bahwa jumlah kejadian gelombang pada September 2004–2023 menurun dibandingkan Agustus pada periode yang sama. Kejadian terbanyak terjadi pada gelombang setinggi 1,25–1,5 meter yang tersebar di seluruh wilayah perairan dengan frekuensi 2–120 kejadian. Gelombang setinggi 1,5–2,5 meter tercatat di Laut Jawa bagian tengah, perairan Karimunjawa, Jepara, serta Pati–Rembang dengan 2–80 kejadian. Kejadian gelombang tinggi diatas 2,5 meter tidak

teramati selama periode tersebut

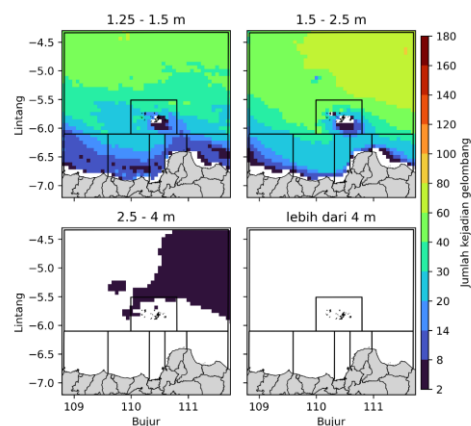
Selama Oktober 2004–2023, jumlah kejadian gelombang menunjukkan penurunan dibandingkan September pada periode yang sama. Gelombang dengan tinggi 1,25–1,5 meter mendominasi di seluruh wilayah perairan dengan frekuensi 2–60 kejadian. Gelombang setinggi 1,5–2,5 meter tercatat di Laut Jawa bagian tengah, perairan Karimunjawa, Jepara, serta Pati–Rembang dengan 2–30 kejadian. Tidak ditemukan gelombang dengan tinggi di atas 2,5 meter.

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan November tahun 2004 - 2023



Gambar 14. Peta jumlah kejadian gelombang bulan November tahun 2004 – 2023

Peta Jumlah Kejadian Gelombang Bulan Desember tahun 2004 - 2023

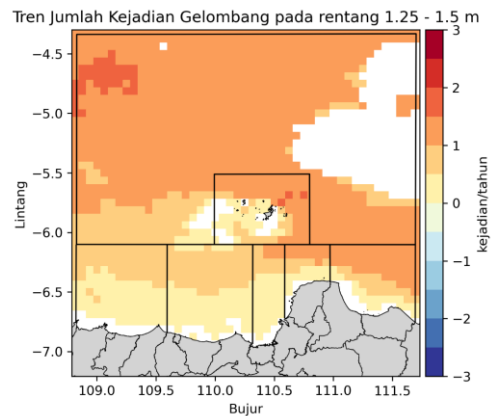


Gambar 15. Peta jumlah kejadian gelombang bulan Desember tahun 2004 – 2023

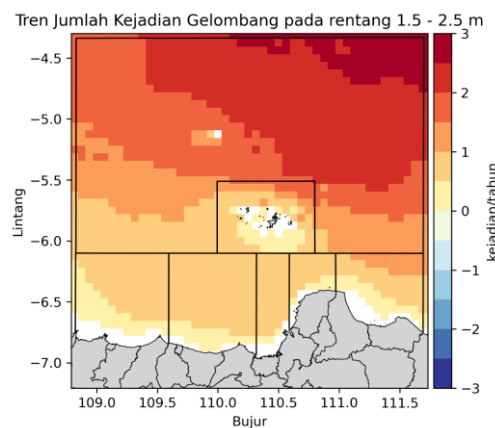
Pada bulan November 2004–2023, jumlah kejadian gelombang mengalami penurunan dibandingkan bulan Oktober. Gelombang dengan tinggi 1,25–1,5 m paling dominan, terutama di Laut Jawa bagian tengah, perairan Karimunjawa, dan wilayah Pekalongan–Kendal, dengan frekuensi 2–20 kejadian. Gelombang setinggi 1,5–2,5 m tercatat di Laut Jawa dan Karimunjawa sebanyak 2–8 kejadian. Tidak ditemukan gelombang dengan tinggi di atas 2,5 m

Selama bulan Desember 2004–2023, jumlah kejadian gelombang meningkat dibandingkan bulan November

pada periode yang sama. Gelombang paling sering terjadi memiliki tinggi 1,5–2,5 meter, tersebar di seluruh wilayah perairan dengan frekuensi 2–80 kejadian. Gelombang 1,25–1,5 meter juga umum terjadi dengan frekuensi hingga 60 kejadian. Gelombang 2,5–4 meter tercatat di Laut Jawa bagian tengah dan perairan Karimunjawa, dengan 2–8 kejadian. Tidak ditemukan gelombang di atas 4 meter. Temuan ini menunjukkan peningkatan kejadian gelombang sedang di bulan Desember, namun gelombang ekstrem masih jarang terjadi.



Gambar 16. Tren tahunan kejadian gelombang dengan tinggi 1,25 - 1,5 m

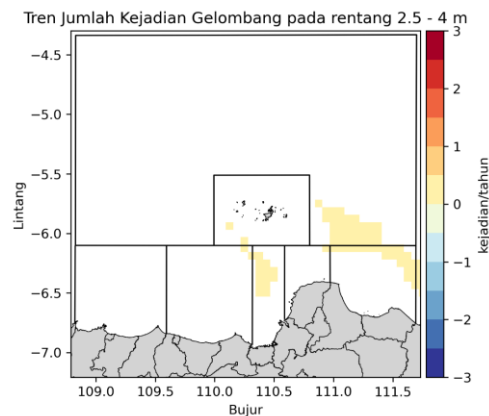


Gambar 17. Tren tahunan kejadian gelombang dengan tinggi 1,25 - 1,5 m

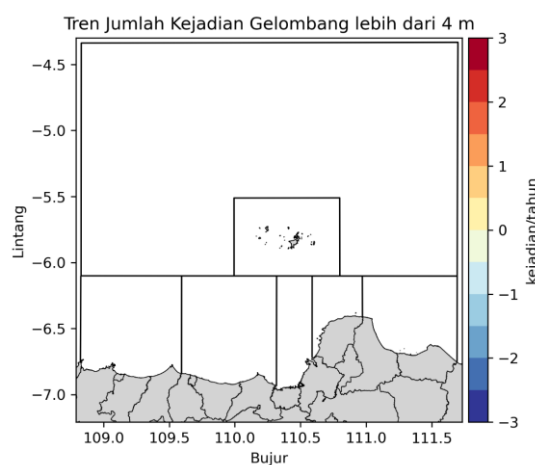
Analisis Tren Tahunan Jumlah Kejadian Gelombang

Analisis tren kejadian gelombang dengan tinggi 1,25 – 1,5 m (Gambar 16) menunjukkan peningkatan frekuensi kejadian di seluruh wilayah perairan. Peningkatan signifikan terjadi di Laut Jawa bagian tengah dan perairan Karimunjawa dengan kenaikan 1–2 kejadian per tahun. Wilayah lain seperti Brebes – Pemalang, Pekalongan – Kendal, Semarang – Demak, Jepara, dan Pati – Rembang mengalami kenaikan sekitar 1 kejadian per tahun.

Data pada Gambar 17 menunjukkan tren peningkatan tahunan kejadian gelombang setinggi 1,5–2,5 meter di seluruh wilayah perairan yang diamati. Peningkatan tertinggi terjadi di Laut Jawa bagian tengah, yakni 1–3 kejadian per tahun. Perairan Karimunjawa mengalami kenaikan 1–2 kejadian per tahun, sementara wilayah Brebes–Pemalang, Pekalongan–Kendal, Semarang–Demak, Jepara, dan Pati–Rembang menunjukkan peningkatan sekitar 1 kejadian per tahun. Temuan ini mengindikasikan perubahan



Gambar 18. Tren tahunan kejadian gelombang dengan tinggi 2,5 - 4 m



Gambar 19. Tren tahunan kejadian gelombang dengan tinggi diatas 4 m

dinamika gelombang yang signifikan di kawasan tersebut.

Analisis tren tahunan gelombang dengan tinggi 2,5–4 meter berdasarkan Gambar 18 menunjukkan hasil yang tidak signifikan. Di sejumlah wilayah perairan, seperti Laut Jawa bagian tengah, Karimunjawa, Pekalongan–Kendal, Semarang–Demak, Jepara, dan Pati–Rembang, tercatat tren 0 kejadian per tahun, yang menandakan stabilitas frekuensi gelombang dalam rentang tersebut dari tahun ke tahun menunjukkan tren tahunan kejadian gelombang dengan tinggi diatas 4 m. Terlihat bahwa tren kejadian gelombang pada rentang tinggi

tersebut menunjukkan hasil yang tidak signifikan pada seluruh wilayah perairan. Kondisi ini disebabkan karena tidak adanya kejadian gelombang diatas 4 m.

Analisis temporal kecepatan angin dan tinggi gelombang di perairan Semarang–Demak menunjukkan dua puncak nilai minimum setiap tahunnya, yaitu pada bulan Januari-Februari dan Juli-Agustus. Nilai minimum kecepatan angin dan tinggi gelombang terjadi pada bulan Maret-April serta Oktober-November, sejalan dengan analisis kejadian tinggi gelombang. Kecepatan angin dan tinggi gelombang di perairan tersebut dipengaruhi oleh pola musim angin

monsun Asia dan Australia yang mempengaruhi kondisi oseanografi Indonesia, termasuk di Semarang (Tjasyono *et al.*, 2008; Kurniawan *et al.*, 2011; Purwanto *et al.*, 2021).

Puncak tinggi gelombang terjadi pada bulan Januari dan Juli, yang terkait dengan puncak angin monsun. Periode transisi antara monsun, yaitu Maret–April–Mei dan September–Oktober–November, ditandai dengan kecepatan angin lebih rendah, yang berakibat pada rendahnya tinggi gelombang (Haryanto *et al.*, 2021; Ma'rufatin *et al.*, 2024). Kecepatan angin yang lebih tinggi pada monsun Asia menyebabkan wilayah terdampak gelombang tinggi lebih luas dibandingkan monsun Australia.

Pada monsun Asia, gelombang dengan tinggi 1,5 - 2,5 m lebih banyak terjadi, sementara pada monsun Australia, kejadian gelombang dengan tinggi 1,25 - 1,5 m lebih dominan. Penghalang seperti pulau mempengaruhi distribusi gelombang, dengan penurunan kejadian gelombang di sekitar Karimunjawa pada periode monsun Asia dan Australia (Efendi *et al.*, 2024; Sprintall *et al.*, 2014). Selain itu, gelombang semakin berkurang menjelang pantai karena pengaruh gesekan dengan dasar laut yang dangkal (Gon *et al.*, 2020; Guillou, 2014; Putnam, 1949).

Berdasarkan analisis BMKG, nelayan dan kapal tongkang harus waspada pada periode Desember–Maret serta Juni–September, mengingat puncak kejadian gelombang dengan tinggi 1,25 - 1,5 m dan 1,5 - 2,5 m terjadi pada bulan-bulan tersebut. Gelombang dengan tinggi 2,5 - 4 m juga perlu diwaspadai pada bulan Januari-Februari, sementara kapal besar relatif aman sepanjang tahun. Tren peningkatan kejadian gelombang 1,25 -

1,5 m dan 1,5 - 2,5 m menunjukkan adanya peningkatan tahunan, sejalan dengan tren global kenaikan tinggi gelombang (Hansom *et al.*, 2015; Lobeto *et al.*, 2021; C. Zheng *et al.*, 2022).

Tren peningkatan kejadian gelombang tinggi perlu diwaspadai oleh nelayan dan operator kapal tongkang. Adaptasi terhadap kondisi ini bisa dilakukan dengan sistem peringatan dini cuaca ekstrem, subsidi biaya melaut, diversifikasi sumber pendapatan nelayan, serta alat tangkap (Moegni *et al.*, 2014; Patriana & Satria, 2013). Meskipun gelombang pada rentang tinggi 1,25 - 2,5 m relatif aman bagi kapal besar, tren peningkatannya harus tetap diwaspadai karena dapat memengaruhi kesehatan awak kapal (Hai *et al.*, 2024; Stevens & Parsons, 2002).

KESIMPULAN

1. Secara temporal, nilai kecepatan angin dan tinggi gelombang di perairan Semarang-Demak selama 2004-2023 menunjukkan pola musiman, dengan dua puncak maksimum (Januari-Februari dan Juli-Agustus) dan dua titik minimum (Maret-April dan Oktober-November). Nilai rata-rata kecepatan angin berkisar 4-9 knot dan tinggi gelombang antara 0,1-1,2 meter.
2. Jumlah kejadian gelombang bulanan di Laut Jawa menunjukkan puncak pada Januari dan Agustus, serta terendah pada April dan Oktober. Kejadian gelombang tertinggi terjadi di Laut Jawa bagian tengah dan menurun menuju pantai utara Jawa Tengah karena kedalaman laut yang lebih dangkal.
3. Analisis tren tahunan antara 2004-2023 menunjukkan peningkatan jumlah kejadian gelombang dengan tinggi 1,25-2,5 meter, masing-masing meningkat 1-

3 kejadian per tahun. Kejadian gelombang di atas 2,5 meter tetap konstan, sementara tren kejadian gelombang lebih dari 4 meter tidak menunjukkan perubahan signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akpınar, A., Bingölbalı, B. 2016. Long-term Variations of Wind and Wave Conditions in the Coastal Regions of the Black Sea. *Natural Hazards*, 84(1),69–92.
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2407-9>.
- Amarouche, K., Akpınar, A., Rybalko, A., Myslenkov, S. 2023. Assessment of SWAN and WAVEWATCH-III Models Regarding the Directional Wave Spectra Estimates based on Eastern Black Sea measurements. *Ocean Engineering*, 272, 113944.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113944>.
- BMKG. 2019. Peraturan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika No. 10 Tahun 2019 tentang Pelayanan Informasi Meteorologi Maritim. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- BMKG. 2024. Saran Keselamatan Berlayar.
<https://maritim.bmkg.go.id/info/37/Saran-Keselamatan-Berlayar>
- Dick, H., Houben, V.J.H., Lindblad, J.T., Thee, K.W. 2002. Emergence of a National Economy: An Economic History of Indonesia, 1800-2000. University of Hawaii Press.
- Efendi, A. N., Geonova, M. F., Widodo, P., Saragih, H. J. R., Suwarno, P., Mamahit, D.A., Trismadi. 2023. Karakteristik Gelombang Laut Indoneisa untuk Mendukung Kegiatan Laut dan Keamanan Maritim. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 346–357.
<https://doi.org/10.33379/gtech.v7i2.1989>.
- Efendi, U., Ismanto, A., Rochaddi, B., Putra, S.M.B. 2024. Wave Characteristics in the Northern Waters of Central Java Based on the Wavewatch III Numerical Model. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(3),525–533.
<https://doi.org/10.14710/jkt.v27i3.24850>.
- Goda, Y. 2010. Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific Publishing.
- Gon, C. J., MacMahan, J. H., Thornton, E. B., Denny, M. 2020. Wave Dissipation by Bottom Friction on the Inner Shelf of a Rocky Shore. *Journal of Geophysical Research: Oceans*,125(10).
<https://doi.org/10.1029/2019JC015963>.
- Guillou, N. 2014. Wave-energy dissipation by bottom friction in the English Channel. *Ocean Engineering*, 82, 42–51.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.02.029>.
- Hai, H. N. T., Bao, N. N., Truong, S. N., Van, T. N. 2024. Characteristics the Living, Working Conditions, and Nutrition of Seafarers Working on Transoceanic Ships: A Cross-sectional Study. *Journal of Marine Medical Society*, 26(3), 404–409.
https://doi.org/10.4103/jmms.jmms_152_23.
- Harahap, A., Khalfianur, W., Niati, C.R. 2017. Pengaruh Gelombang Laut terhadap Hasil Tangkapan Nelayan di Kuala Langsa. *Samudra Akuatika*, 1(2), 21–25.
- Haryanto, Y. D., Riama, N. F., Purnama, D. R., Pradita, N., Ismah, S. F., Suryo, A.W., Fadli, M., Hananto, N. D., Li, S., Susanto, R.D. 2021. Effect of Monsoon Phenomenon on Sea Surface Temperatures in Indonesian Throughflow Region and Southeast Indian Ocean. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(6), 914–923.
<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.56.6.80>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D.,

- Thépaut, J.-N. 2023. ERA5 Hourly Data on Single Levels from 1940 to Present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- Holthuijsen, L. H. 2010. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press. J. A. Putnam, J. W. J. 1949. The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 30(1), 67–74. <https://doi.org/10.1029/TR030i001p00067>.
- Kazeminezhad, M.H., Ghavanini, F.A. 2023. Operational Wave Forecasting for Extreme Conditions in the Arabian Sea – A comparison with Buoy and Satellite Data. *Ocean Engineering*, 275, 114152. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114152>.
- Kessali, N., Bouhamadouche, M., Hemdane, Y. 2023. Near-shore and Regional Validation of the WAVEWATCH III and SWAN Wave Models through In situ and Satellite Observations in the Barcelona Bay and Algerian Coast. *Russian Meteorology and Hydrology*, 48(3), 267–279. <https://doi.org/10.3103/S1068373923030093>.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N., Permana, D. S. 2012. Kajian Daerah Rawan Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(3). <https://doi.org/10.31172/jmg.v13i3.135>.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N., Suratno. 2011. Variasi Bulanan Gelombang Laut di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12(3), 221–232.
- Kurniawan, R., Harsa, H., Ramdhani, A., Fitria, W., Rahmawati, D., Habibie, M. N., Hutapea, T. D. 2021. Evaluating Skill of BMKG Wave Model Forecast (Wavewatch-3) with Observation Data in Indian Ocean (5 – 31 December 2017). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012058>.
- Kurniawan, R., Khotimah, M. K. 2016. Ocean Wave Characteristics in Indonesian Waters for Sea Transportation Safety and Planning. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 26(1). <https://doi.org/10.12962/j20882033.v26i1.767>.
- Laloue, A., Ghantous, M., Faugère, Y., Dalphiné, A., Aouf, L. 2024. Statistical Analysis of Global Ocean Significant Wave Heights from Satellite Altimetry Over The Past 2 Decades. <https://doi.org/10.5194/sp-4-osr8-6-2024>.
- Lobeto, H., Menendez, M., Losada, I.J. 2021. Future Behavior of Wind Wave Extremes Due to Climate Change. *Scientific Reports*, 11(1), 7869. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86524-4>.
- Ludji, J.F., Koehuan, V.A. 2014. Analisis Efisiensi Sistem Osilator Kolom Air sebagai Pembangkit Daya Tenaga Gelombang Laut. *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana (LJTMU)*, 1(2), 18–25.
- Ma'rufatin, A., Yananto, A., Pandoe, W. W. 2024. Karakteristik Angin Wilayah Pesisir Utara Pulau Jawa Berdasarkan Variabilitas Monsun. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(1), 20–30.
- Meng, W., Li, S., Wang, X., Jiang, H. 2023. Wind-Sea and Swell Separation of 1D Wave Spectrum by Deep Learning. *Ocean Engineering*, 270, 113672. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113672>.
- Moegni, N., Rizki, A., Prihantono, G. 2014. Adaptasi Nelayan Perikanan Laut Tangkap dalam Menghadapi Perubahan Iklim. *Jurnal Ekonomi & Studi Pembangunan*, 15(2), 182–189.

- Muraleedharan, G., Rao, A., Sinha, M. 2007. Extreme Wave Height Prediction and Validation for a Cyclonic Condition during Southwest Monsoon. 3rd International Conference on Solar Radiation and Day Lighting, 1–10.
- Musić, S., Nicković, S. 2008. 44-year Wave Hindcast for the Eastern Mediterranean. *Coastal Engineering*, 55(11), 872–880. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.024>.
- Ningsih, N. S., Azhari, A., Al-Khan, T. M. 2023. Wave Climate Characteristics and Effects of Tropical Cyclones on High Wave Occurrences in Indonesian Waters: Strengthening Sea Transportation Safety Management. *Ocean & Coastal Management*, 243, 106738. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106738>.
- Nugroho, D., Yulihastin, E., Risandi, J. 2022. Ocean Surface Wave Characteristic in the Java Sea based on Global Reanalysis Data. 060004. <https://doi.org/10.1063/5.0108243>.
- Patriana, R., Satria, A. 2013. Pola Adaptasi Nelayan terhadap Perubahan Iklim: Studi Kasus Nelayan Dusun Ciawitali, Desa Pamotan, Kecamatan Kalipucang, Kabupaten Ciamis, Jawa Barat. *Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 8(1), 11–23.
- Pinardi, N., Cavaleri, L., Coppini, G., De Mey, P., Fratianni, C., Huthnance, J., Lermusiaux, P. F. J., Navarra, A., Preller, R., Tibaldi, S. 2017. From Weather to Ocean Predictions: An Historical Viewpoint. *Journal of Marine Research*, 75(3), 103–159. <https://doi.org/10.1357/002224017821836789>.
- Purwanto, P., Sugianto, D. N., Zainuri, M., Permatasari, G., Atmodjo, W., Rochaddi, B., Ismanto, A., Wetchayont, P., Wirasatriya, A. 2021. Seasonal Variability of Waves Within the Indonesian Seas and Its Relation With the Monsoon Wind. *ILMU KELAUTAN. Indonesian Journal of Marine Sciences*, 26(3), 189–196. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.26.3.189-196>.
- Qiao, F., Zhao, W., Yin, X., Huang, X., Liu, X., Shu, Q., Wang, G., Song, Z., Li, X., Liu, H., Yang, G., Yuan, Y. 2016. A Highly Effective Global Surface Wave Numerical Simulation with Ultra-High Resolution. *International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, SC*, 0(November), 46–56. <https://doi.org/10.1109/SC.2016.4>.
- Rachmayani, R., Ningsih, N. S., Ramadhan, H., Nurfitri, S. 2018. Analysis of Ocean Wave Characteristic in Western Indonesian Seas using Wave Spectrum Model. *MATEC Web of Conferences*, 147, 05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814705001>.
- Ribal, A., Babanin, A. V., Zieger, S., Liu, Q. 2020. A High-Resolution Wave Energy Resource Assessment of Indonesia. *Renewable Energy*, 160, 1349–1363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.017>.
- Rogers, W. E., Dykes, J., Wittmann, P. 2014. US Navy Global and Regional Wave Modeling. *Oceanography*, 27(3), 56–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.68>.
- Rosenthal, W., Lehner, S. 2008. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(2). <https://doi.org/10.1115/1.2918126>.
- Salim, A. 2023. Dampak Perubahan Iklim terhadap Transportasi Laut. *SENSISTEK*, 6(2), 168–171.
- Setiawan, B. 2021. Pengaruh Seruakan Dingin Asia Terhadap Tinggi Gelombang Maksimum di Selat Karimata dan Laut Jawa. *Megasains*, 12(2), 42–47.

- <https://doi.org/10.46824/megasains.v12i2.82>.
- Sprintall, J., Arnold L. Gordon, Ariane Koch-Larrouy, Lee, T., James T. Potemra, Kandaga Pujiana, Wijffels, S. E. 2014. The Indonesian Seas and Their Role in the Coupled Ocean-Climate System. *Nature Geosciences*, 7(7), 487–492.
- Stevens, S. C., Parsons, M. G. 2002. Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey. *Marine Technology and SNAME News*, 39(01), 29–47. <https://doi.org/10.5957/mt1.2002.39.1.29>.
- Sunardi, E. F., Choiron, M. A., Sugiarto, A. W. M., Setyarini, P. H., Nurwahyudi, A. 2024. Fishing Vessel Safety in Indonesia: A Study of Accident Characteristics and Prevention Strategies. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 14(2), 499–511. <https://doi.org/10.18280/ijssse.1402.17>.
- Syme, G. J., Dzidic, P., Dambacher, J. M. 2012. Enhancing Science in Coastal Management Through Understanding Its Role in the Decision Making Network. *Ocean & Coastal Management*, 69, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoama.2012.08.012>.
- Thomas, T. J., Dwarakish, G. S. 2015. Numerical Wave Modelling – A Review. *Aquatic Procedia*, 4, 443–448. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.059>.
- Valiente, N. G., Saulter, A., Gomez, B., Bunney, C., Li, J.-G., Palmer, T., Pequignet, C. 2023. The Met Office Operational Wave Forecasting System: the Evolution of the Regional and Global Models. *Geoscientific Model Development*, 16(9), 2515–2538. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2515-2023>.
- Windupranata, W., Nusantara, A.D.S., Wijaya, C., Prijatna, D. 2019. Impact Analysis of Tropical Cyclone Cempaka-Dahlia on Wave Heights in Indonesian Waters from Numerical Model and Altimetry Satellite. *KnE Engineering*. <https://doi.org/10.18502/keg.v4i3.5851>.
- WW3DG. 2016. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16 Tech. Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB.
- Zhang, Z., Li, X.-M. 2017. Global Ship Accidents and Ocean Swell-Related Sea States. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(11), 2041–2051. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2041-2017>.
- Zheng, C., Li, X., Azorin-Molina, C., Li, C., Wang, Q., Xiao, Z., Yang, S., Chen, X., Zhan, C. 2022. Global Trends in Oceanic Wind Speed, Wind-Sea, Swell, and Mixed Wave Heights. *Applied Energy*, 321, 119327. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119327>.
- Zheng, K., Sun, J., Guan, C., Shao, W. 2016. Analysis of the Global Swell and Wind Sea Energy Distribution Using WAVEWATCH III. *Advances in Meteorology*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/8419580>.
- Zieger, S., Greenslade, D., Harley, M., Turner, I., Splinter, K., Hansen, J., Lowe, R., Kinsela, M., Cuttler, M. 2019. Variable-resolution Wave Modelling for Coastal Applications. *Australasian Coasts & Ports 2019 Conference*, 1262–1266.
- Adhitya, G.W. 2018. Olah Gerak Kapal MV. Bernhard Schulte Dalam Kondisi Lightship saat Menghadapi Hurricane Matthew. *Jurnal Dinamika Bahari*. 1–10.