

Hubungan Variabilitas *Seas* - *Swell* dengan ENSO di Laut Banda (1990 – 2022)

Achmad Suva Fauzan¹, Aris Ismanto¹, Rikha Widiaratih^{1,2*}

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais. Tembalang Semarang Jawa Tengah 50275, Indonesia

²Department of Naval Architecture, Ocean & Marine Engineering, University of Strathclyde
16 Richmond Street, Glasgow, G1 1XQ, United Kingdom
Email: *rikhawidiaratih@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Laut Banda merupakan salah satu perairan paling dinamis di Indonesia yang dipengaruhi oleh sistem monsun, Arus Lintas Indonesia (Arlindo), dan variabilitas iklim global, khususnya El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Variabilitas tersebut berperan dalam mengendalikan karakteristik gelombang laut tipe wind waves (*seas*) dan *swell* yang penting bagi keselamatan pelayaran, kegiatan perikanan, serta pengelolaan wilayah pesisir. Meskipun pengaruh ENSO terhadap berbagai parameter oseanografi telah banyak dilaporkan, kajian mengenai hubungan variabilitas ENSO terhadap karakteristik *seas* dan *swell* di Laut Banda masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik spasial dan temporal *seas* dan *swell* serta mengkaji hubungan keduanya dengan variabilitas ENSO. Penelitian menggunakan data reanalisis periode 1990–2022 yang dianalisis melalui metode komposit klimatologi dan korelasi Pearson. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *seas* berkembang dominan pada Musim Timur dengan tinggi gelombang signifikan maksimum mencapai 0,95 m, sedangkan *swell* lebih dominan pada Musim Barat dan musim peralihan dengan tinggi maksimum sekitar 0,77 m. Selama fase La Niña, tinggi gelombang *seas* dan *swell* cenderung lebih tinggi dibandingkan fase El Niño akibat penguatan angin monsun. Analisis korelasi menunjukkan bahwa hubungan langsung ENSO terhadap *seas* dan *swell* relatif lemah hingga sedang ($r = -0,5140$ hingga $0,2367$), sedangkan hubungan antara angin dan gelombang tergolong kuat hingga sangat kuat ($r = 0,7056$ – $0,9233$). Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh ENSO terhadap karakteristik gelombang di Laut Banda lebih banyak dimediasi oleh perubahan kekuatan angin monsun dibandingkan melalui pengaruh langsung. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung prakiraan gelombang laut, keselamatan pelayaran, serta pengelolaan sumber daya kelautan di wilayah Indonesia timur.

Kata kunci : El Niño–Southern Oscillation, Laut Banda, Angin Monsun, Gelombang Laut

Abstract

Relation between Seas - Swell Variabilities with ENSO in Banda Seas (1990 – 2022)

The Banda Sea is one of the most dynamic marine regions in Indonesia, influenced by the Asian–Australian monsoon system, the Indonesian Throughflow (ITF), and large-scale climate variability, particularly the El Niño–Southern Oscillation (ENSO). These processes play an important role in controlling the characteristics of wind waves (seas) and swell, which are essential for navigation safety, fisheries, and coastal resource management. Although the influence of ENSO on various oceanographic parameters has been widely documented, studies investigating its relationship with seas and swell characteristics in the Banda Sea remain limited. Therefore, this study aimed to analyze the spatial and temporal characteristics of seas and swell, and to examine their relationship with ENSO variability. Reanalysis data from 1990 to 2022 were analyzed using climatological composite and Pearson correlation analyses. The results showed that seas were dominant during the Southeast Monsoon, reaching a maximum significant wave height of 0.95 m, whereas swell was more dominant during the Northwest Monsoon and the transition seasons, with a maximum significant wave height of approximately 0.77 m. During La Niña events, both seas and swell exhibited higher significant wave heights than during El Niño, primarily due to stronger monsoon winds. Correlation analysis revealed that the direct relationship between ENSO and wave characteristics was relatively weak to moderate ($r = -0.5140$ to 0.2367), whereas the relationship between wind and waves was strong to very strong ($r = 0.7056$ – 0.9233).

These findings indicate that the influence of ENSO on wave characteristics in the Banda Sea is predominantly mediated through changes in monsoon wind intensity rather than through a direct effect. This study provides valuable insights for wave forecasting, navigation safety, and marine resource management in eastern Indonesian waters.

Keyword: *El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Banda Sea, monsoon winds, wave height.*

PENDAHULUAN

Laut Banda merupakan salah satu wilayah oseanografi paling dinamis di Indonesia karena dipengaruhi oleh interaksi berbagai proses fisik, termasuk sistem monsun, Arus Lintas Indonesia (Arlindo/Indonesian Throughflow), topografi laut dalam berbentuk cekungan (*deep basin*), serta variabilitas iklim regional maupun global Hutahean & Wilson (1992). Dengan kedalaman lebih dari 7.000 m, Laut Banda berperan sebagai salah satu jalur utama transport massa air dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia melalui sistem Arlindo. Selain itu, wilayah ini dikenal memiliki aktivitas upwelling musiman yang intens sehingga menghasilkan produktivitas primer dan potensi perikanan yang tinggi (Kämpf & Chapman, 2016). Di antara berbagai faktor pengendali tersebut, El Niño–Southern Oscillation (ENSO) merupakan salah satu fenomena iklim global yang paling berpengaruh terhadap variabilitas oseanografi di Laut Banda. Perubahan fase ENSO memodifikasi pola angin, distribusi tekanan atmosfer, transport Arlindo, intensitas upwelling, suhu permukaan laut (SST), serta struktur kolom air di wilayah Indonesia. Selama kejadian El Niño, penguatan angin tenggara umumnya meningkatkan upwelling dan pendinginan SST di Indonesia timur, sedangkan kondisi La Niña menghasilkan respons yang berlawanan melalui pelemahan upwelling dan peningkatan SST. Perubahan-perubahan tersebut menunjukkan bahwa ENSO tidak hanya memengaruhi kondisi atmosfer, tetapi juga dinamika laut yang mengontrol karakteristik gelombang laut.

Gelombang laut sendiri merupakan salah satu parameter hidrodinamika yang penting karena berpengaruh terhadap keselamatan pelayaran, operasi kelautan, pengelolaan wilayah pesisir, serta aktivitas perikanan (Rizal & Ningsih, 2022). Berdasarkan mekanisme pembangkitannya, gelombang dibedakan menjadi wind waves (seas) yang dibangkitkan oleh angin lokal, dan swell yang berasal dari sistem angin di wilayah yang jauh Ethamony *et al.* (2013). Karakteristik sea dan swell sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer dan oseanografi sehingga perubahan sirkulasi akibat ENSO berpotensi memodifikasi distribusi maupun dominasi kedua tipe gelombang tersebut. Sejumlah penelitian telah mengkaji pengaruh ENSO terhadap berbagai parameter oseanografi di Laut Banda, seperti suhu permukaan laut dan klorofil-*a* (Nurafifah *et al.* , 2022), serta variabilitas *mixed layer depth* di wilayah Indonesia timur (Amalia *et al.* , 2023). Di sisi lain, penelitian mengenai karakteristik seas dan swell telah dilakukan oleh Purwanto *et al.* (2021) di perairan Indonesia secara umum, Aramburo *et al.* (2022) di Samudra Pasifik, dan Lin *et al.* (2019) di Pasifik Barat dan Laut Cina Selatan. Meskipun demikian, hubungan antara variabilitas ENSO dengan karakteristik seas dan swell di Laut Banda belum banyak dikaji, padahal wilayah ini memiliki kombinasi unik antara pengaruh Arlindo, laut dalam, upwelling, dan variabilitas monsun yang berpotensi menghasilkan respons gelombang yang berbeda dibandingkan wilayah lain.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis karakteristik spasial dan temporal gelombang tipe wind waves (seas) dan swell di Laut Banda, serta (2) mengevaluasi pengaruh variabilitas ENSO terhadap perubahan karakteristik kedua tipe gelombang tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman mengenai respons dinamika gelombang terhadap variabilitas iklim di salah satu wilayah laut terdalam dan paling dinamis di Indonesia, sekaligus memberikan informasi yang bermanfaat bagi keselamatan pelayaran, pengelolaan sumber daya kelautan, dan mitigasi bahaya kelautan Kurniawan *et al.* (2012).

MATERI DAN METODE

Area penelitian berada di Laut Banda, yang terletak pada koordinat 2,5° LU–7° LS dan 124°–132° BT (Gambar 1). Laut Banda merupakan salah satu perairan terdalam di Indonesia dengan kedalaman mencapai lebih dari 7.000 m, serta memiliki karakteristik topografi berupa cekungan laut dalam (*deep basin*). Selain itu, Laut Banda merupakan salah satu jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang menghubungkan Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, sehingga memiliki dinamika oseanografi yang sangat kompleks. Kondisi oseanografi Laut Banda dipengaruhi oleh interaksi berbagai proses fisik, antara lain sistem monsun Asia–

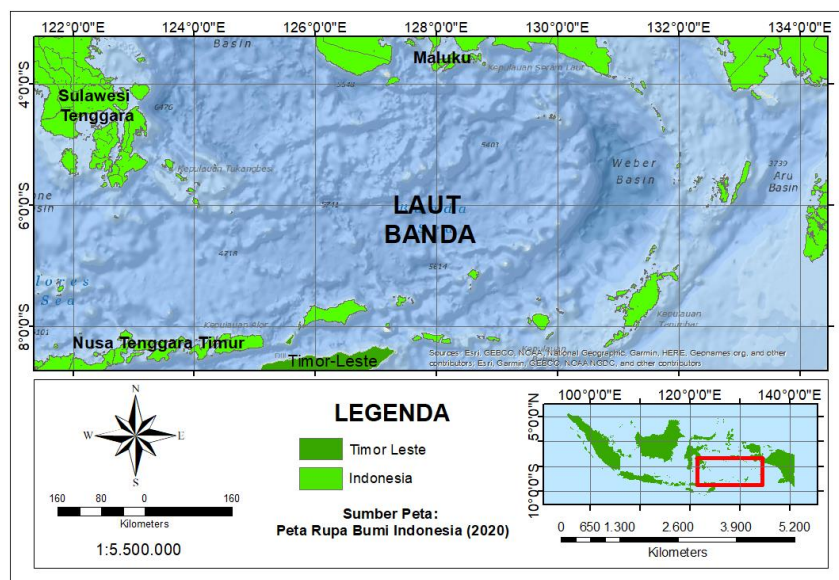
Australia, Arlindo, upwelling musiman, serta variabilitas iklim global seperti El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Pada musim timur, penguatan angin tenggara memicu terjadinya upwelling yang menyebabkan penurunan suhu permukaan laut, peningkatan konsentrasi nutrisi, dan tingginya produktivitas primer. Sebaliknya, pada musim barat intensitas upwelling melemah sehingga suhu permukaan laut cenderung meningkat.

Selain dipengaruhi oleh dinamika oseanografi tersebut, Laut Banda juga merupakan wilayah yang memiliki karakteristik gelombang laut yang kompleks karena dipengaruhi oleh gelombang lokal (*seas*) yang dibangkitkan oleh angin setempat serta gelombang *swell* yang berasal dari daerah pembangkitan gelombang yang jauh. Interaksi antara kondisi laut dalam, Arlindo, sistem monsun, serta variabilitas ENSO menyebabkan karakteristik *seas* dan *swell* di Laut Banda berubah secara spasial maupun temporal. Selain memiliki karakteristik oseanografi yang unik, hingga saat ini penelitian mengenai keterkaitan antara variabilitas ENSO dengan karakteristik gelombang laut tipe *seas* dan *swell* secara spesifik di Laut Banda masih sangat terbatas. Oleh karena itu, wilayah ini dipilih sebagai lokasi penelitian untuk mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut. Karakteristik tersebut menjadikan Laut Banda sebagai salah satu wilayah yang sangat representatif untuk mengkaji pengaruh variabilitas ENSO terhadap perubahan karakteristik gelombang laut tipe *seas* dan *swell*, sehingga diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika gelombang laut pada perairan Indonesia bagian timur.

Data penelitian bersumber dari data satelit yang merupakan data angin, *seas* dan *swell* dari Copernicus yang ditunjukkan pada Tabel 1. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis deskriptif untuk mengidentifikasi karakteristik angin, *seas*, dan *swell*, serta menganalisis hubungan antara variabilitas El Niño Southern Oscillation (ENSO) dengan kondisi gelombang laut di Laut Banda. Seluruh proses pengolahan dan visualisasi data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python.

Tabel 1. Data Penelitian

No	Nama Data	Fungsi	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal	Jangka Waktu	Link
1.	Data angin <i>Marine Copernicus</i> perairan Laut Banda	Input data pada di <i>python</i>	0.25° x 0.25°	Monthly/ Bulanan	1990 - 2022	https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home
2.	Data <i>Seas – swell</i> CDS Copernicus versi ERA 5	Input data pada di <i>python</i>	0.5° x 0.5°	Monthly/ Bulanan	1990 - 2022	https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home



Gambar 1. Peta lokasi penelitian (Peta Rupa Bumi Indonesia, 2020)

Tahap pertama adalah pengolahan data angin untuk memperoleh kecepatan angin sesungguhnya (*wind speed*) dari komponen angin zonal (u) dan meridional (v). Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan (1) (Hatmaja *et al.*, 2019):

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

dengan: V = kecepatan angin (ms^{-1}); u = komponen kecepatan angin arah zonal (ms^{-1}); v = komponen kecepatan angin arah meridional (ms^{-1}).

Selanjutnya, seluruh data angin dan gelombang diolah menjadi klimatologi bulanan menggunakan metode komposit berdasarkan nilai rata-rata bulanan selama periode pengamatan. Perhitungan klimatologi mengikuti Ramadhan *et al.* (2021) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2):

$$\bar{X}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(x, y, t) \quad (2)$$

dengan: $\bar{X}(x, y)$ = nilai rata-rata klimatologi bulanan pada lokasi (x, y) ; $x_i(x, y, t)$ = nilai pengamatan ke- i ; n = jumlah data dalam satu bulan. Hasil komposit klimatologi selanjutnya digunakan untuk menggambarkan distribusi spasial dan variasi musiman kecepatan angin, seas, dan swell di Laut Banda.

Hubungan antara variabilitas ENSO dengan karakteristik seas dan swell dianalisis menggunakan korelasi Pearson, yang digunakan untuk mengukur keeratan hubungan linier antara dua variabel (Rahayu *et al.*, 2023). Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan Persamaan (3):

$$r = \frac{N(\sum xy) - (\sum x \sum y)}{\sqrt{N(\sum x^2 - (\sum x)^2) - N(\sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

dengan: r = koefisien korelasi Pearson; x = variabel independen (indeks ENSO); y = variabel dependen (seas atau swell); N = jumlah data pengamatan. Nilai koefisien korelasi berada pada rentang -1 hingga $+1$. Nilai positif menunjukkan hubungan searah, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah. Semakin mendekati nilai ± 1 menunjukkan hubungan yang semakin kuat, sedangkan nilai yang mendekati nol menunjukkan hubungan yang lemah (Nurafifah *et al.*, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

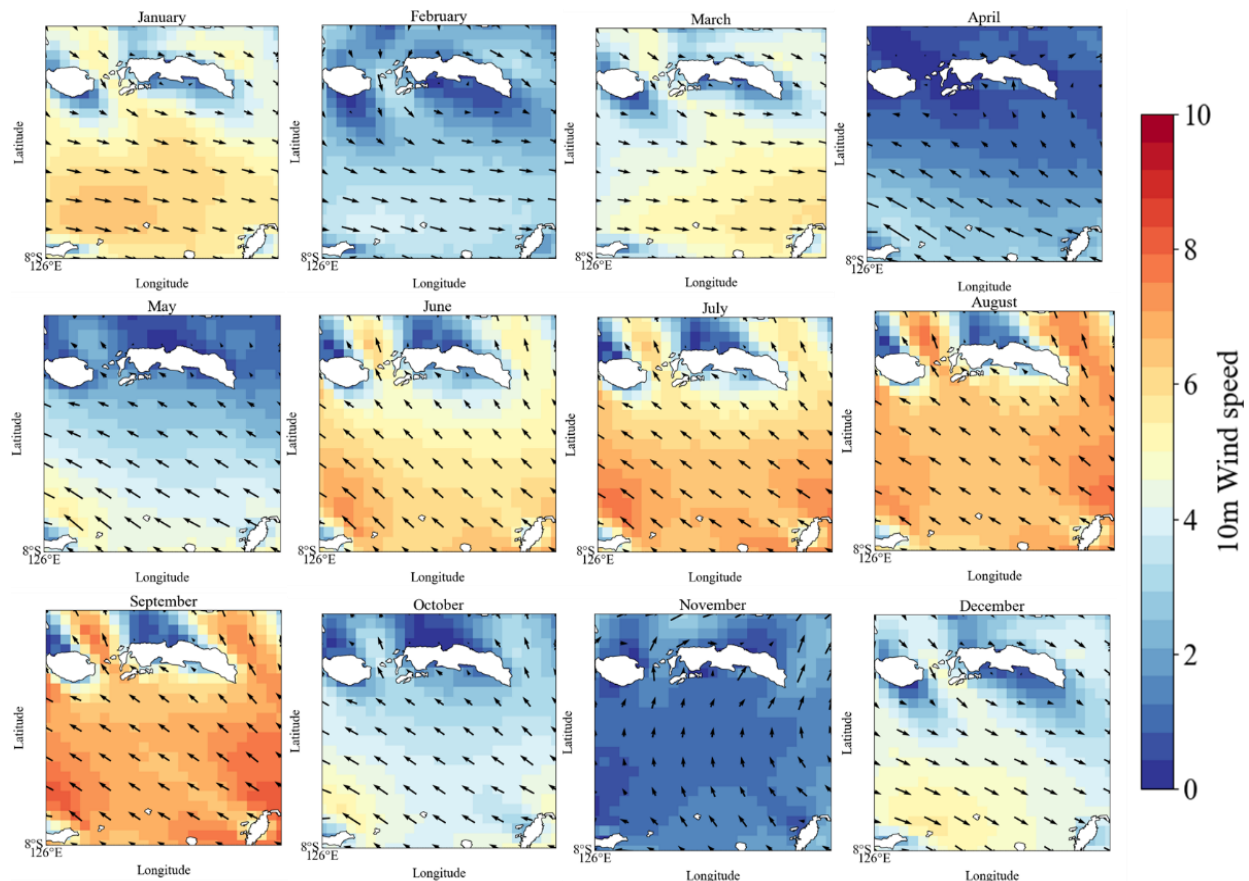
Kondisi Angin di Laut Banda

Angin merupakan faktor utama pembangkit gelombang laut dan berperan penting dalam menentukan karakteristik seas maupun swell. Menurut Trisianto *et al.* (2021), terbentuknya angin disebabkan oleh perbedaan tekanan udara yang dipengaruhi oleh distribusi penyinaran Matahari di permukaan bumi. Pergerakan semu tahunan Matahari menyebabkan terjadinya perubahan pola tekanan udara sehingga menghasilkan sistem angin musiman (*monsoon*) yang secara langsung memengaruhi dinamika oseanografi di wilayah Indonesia.

Hasil analisis klimatologi kecepatan dan arah angin selama periode 1990–2022 di Laut Banda disajikan pada Gambar 3. Secara umum, pola angin di wilayah ini menunjukkan variasi musiman yang kuat mengikuti sistem monsun Asia–Australia.

Berdasarkan Gambar 3, pada Musim Barat (Desember–Februari), kecepatan angin berkisar antara 3,33–4,51 m/s dengan arah dominan bertiup dari barat hingga barat laut menuju timur dan tenggara. Sebaliknya, pada Musim Timur (Juni–Agustus), kecepatan angin meningkat menjadi 5,15–6,04 m/s, dengan arah dominan berasal dari timur hingga tenggara menuju barat dan barat laut. Pada periode Peralihan I (Maret–Mei) dan Peralihan II (September–November), kecepatan angin relatif lebih rendah, masing-masing berkisar 0,46–3,62 m/s dan 0,51–3,32 m/s, yang mencerminkan melemahnya sistem monsun selama masa transisi musim.

Kecepatan angin maksimum tercatat pada bulan Juli sebesar 6,04 m/s, sedangkan kecepatan minimum terjadi pada bulan April sebesar 0,46 m/s, dengan rata-rata klimatologis tahunan sebesar 3,69 m/s. Variasi musiman tersebut menunjukkan bahwa intensitas angin di Laut Banda sangat dipengaruhi oleh sistem monsun, terutama penguatan angin tenggara selama Musim Timur.



Gambar 3. Distribusi rata – rata kecepatan angin yang terdeteksi di Laut Banda secara klimatologi dalam 32 tahun (1990 – 2022)

Pola ini sejalan dengan Habibie *et al.* (2018) yang menyatakan bahwa wilayah Laut Banda mengalami penguatan angin selama Musim Timur akibat dominasi monsun tenggara dari Benua Australia menuju Asia. Penguatan angin tersebut meningkatkan transfer momentum dari atmosfer ke permukaan laut sehingga memperbesar energi gelombang yang dibangkitkan. Dengan demikian, kondisi wind waves (seas) di Laut Banda diperkirakan mencapai intensitas maksimum pada periode Juni–Agustus, sedangkan pada musim peralihan pembentukan gelombang lokal cenderung melemah akibat rendahnya kecepatan angin.

Selain memengaruhi seas, perubahan pola angin musiman juga berpotensi mengubah karakteristik swell melalui perubahan medan angin regional di sekitar Laut Banda. Oleh karena itu, variabilitas angin musiman merupakan salah satu faktor utama yang mengontrol dinamika gelombang laut di wilayah penelitian dan menjadi dasar untuk menganalisis pengaruh variabilitas ENSO terhadap karakteristik seas dan swell pada bagian berikutnya.

Meskipun pola angin di Laut Banda terutama dikendalikan oleh sistem monsun, intensitas dan arah angin juga dipengaruhi oleh variabilitas iklim antar-tahunan, khususnya El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Perubahan sirkulasi atmosfer selama fase El Niño maupun La Niña dapat memperkuat atau melemahkan sistem monsun sehingga berpotensi mengubah karakteristik gelombang lokal (seas) maupun gelombang datang (swell). Oleh karena itu, analisis hubungan antara variabilitas ENSO dan karakteristik gelombang laut menjadi penting untuk memahami dinamika hidrodinamika Laut Banda secara lebih komprehensif.

Perbandingan Seas dengan Swell di Laut Banda

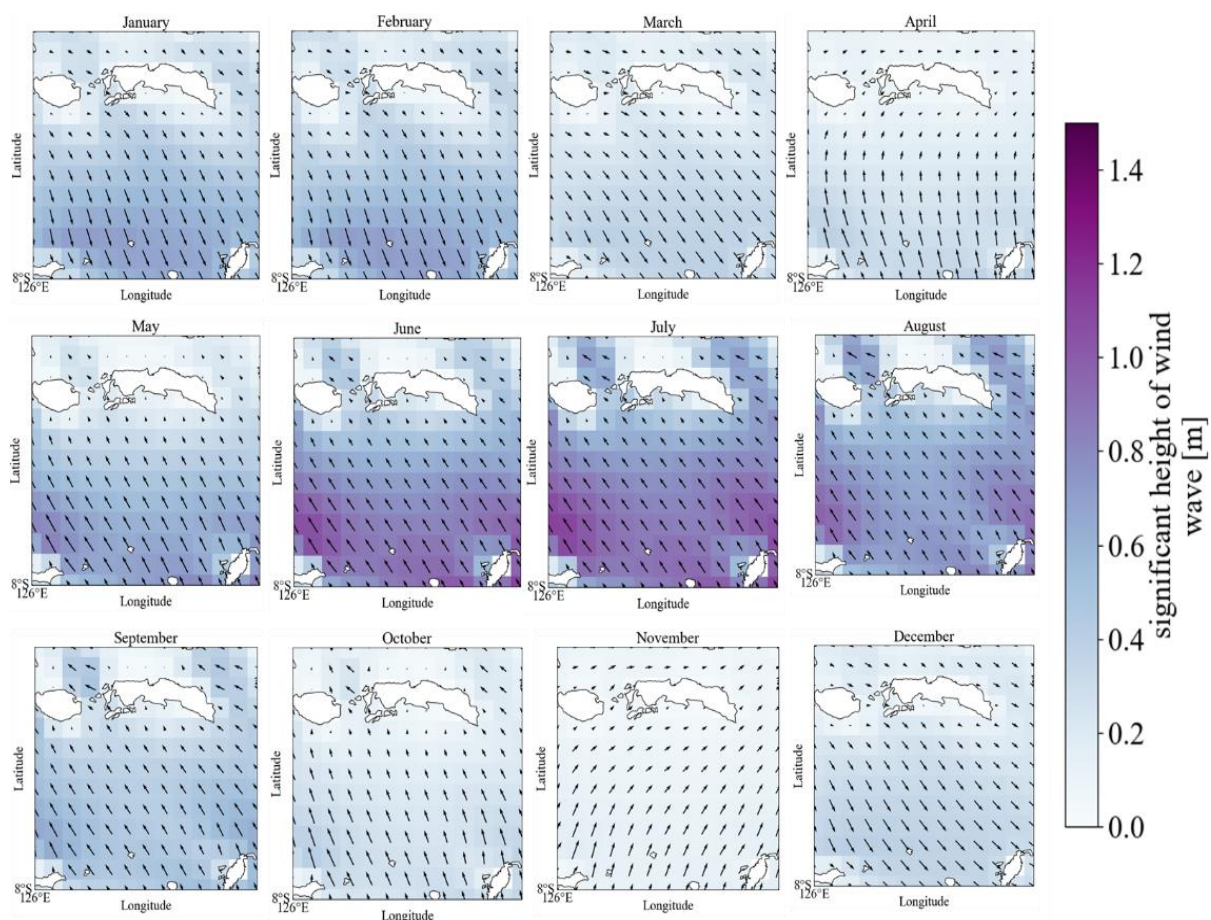
Gelombang laut yang dibangkitkan oleh angin secara umum dibedakan menjadi dua jenis, yaitu wind waves (seas) dan swell. Seas merupakan gelombang yang terbentuk akibat pengaruh angin lokal, sedangkan swell merupakan gelombang yang berasal dari daerah pembangkitan gelombang yang jauh (*remote generation*

area). Perbedaan mekanisme pembangkitan tersebut menyebabkan karakteristik seas dan swell berbeda, baik dari segi arah rambat maupun tinggi gelombang.

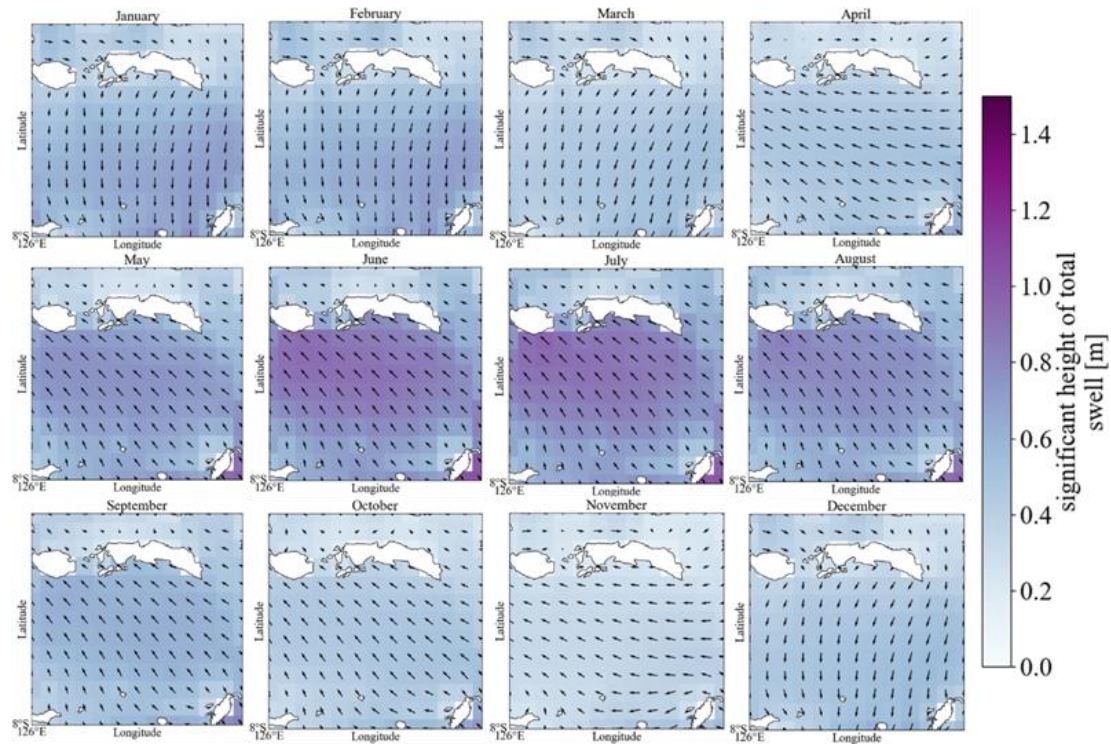
Distribusi klimatologi arah dan tinggi gelombang tipe *seas* selama periode 1990–2022 disajikan pada Gambar 4, sedangkan distribusi klimatologi gelombang tipe *swell* ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, arah dominan seas di Laut Banda umumnya bergerak ke arah timur laut, sedangkan pada Musim Barat orientasi gelombang berubah menuju barat daya mengikuti perubahan arah angin monsun. Sebaliknya, pola swell menunjukkan arah yang relatif lebih konsisten dibandingkan seas, karena lebih dipengaruhi oleh kondisi gelombang dari wilayah pembangkit di luar Laut Banda dibandingkan oleh angin lokal.

Perbandingan tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*) antara *seas* dan *swell* selama periode klimatologi disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, tinggi gelombang signifikan seas menunjukkan variasi musiman yang lebih besar dibandingkan swell. Tinggi gelombang maksimum terjadi pada bulan Juli dengan nilai sekitar 0,95 m, sedangkan nilai minimum terjadi pada musim peralihan, yaitu sekitar 0,26 m pada Peralihan I dan 0,12 m pada Peralihan II. Secara umum, tinggi gelombang seas mulai meningkat pada Musim Peralihan I (Maret–Mei), mencapai maksimum pada Musim Timur (Juni–Agustus), kemudian menurun kembali pada Musim Peralihan II (September–November).

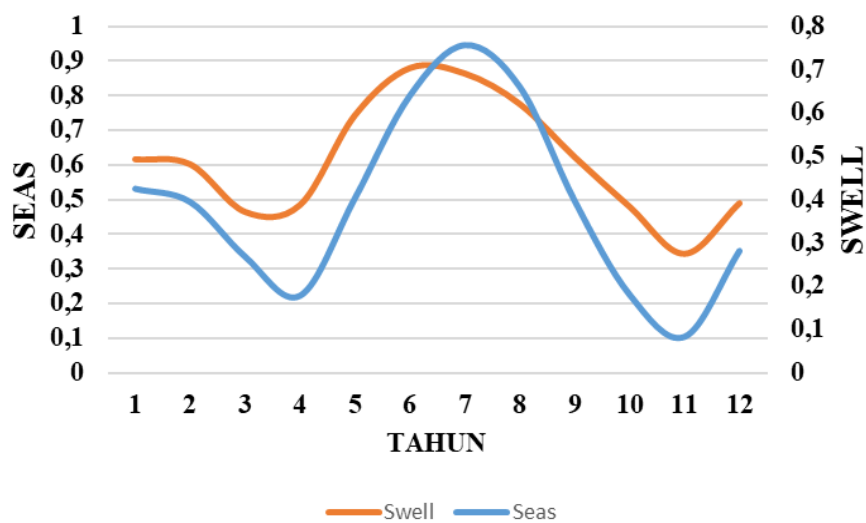
Karakteristik yang berbeda ditunjukkan oleh swell, yang secara umum memiliki tinggi gelombang lebih rendah dibandingkan seas. Tinggi gelombang maksimum swell mencapai sekitar 0,77 m pada Musim Timur. Menariknya, selama Musim Timur tinggi seas lebih besar dibandingkan swell, sedangkan pada Musim Barat dan kedua musim peralihan swell cenderung memiliki tinggi gelombang yang relatif lebih besar daripada seas. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada Musim Timur pembentukan gelombang lebih didominasi oleh angin lokal, sedangkan pada musim lainnya kontribusi gelombang yang berasal dari luar wilayah Laut Banda menjadi relatif lebih besar.



Gambar 4. Distribusi rata – rata *seas* yang terdeteksi di Laut Banda secara klimatologi dalam 32 tahun (tahun 1990 – 2022)



Gambar 5. Distribusi rata – rata *swell* yang terdeteksi di Laut Banda secara klimatologi dalam 32 tahun (tahun 1990 – 2022)



Gambar 6. Ketinggian signifikan *seas* dan *swell* yang terdeteksi di Laut Banda secara klimatologi (1990 – 2022)

Perbedaan karakteristik tersebut berkaitan erat dengan kondisi geografis dan oseanografi Laut Banda. Menurut Purwanto *et al.* (2021), Laut Banda merupakan perairan semi-tertutup yang dikelilingi oleh gugusan kepulauan Indonesia sehingga perkembangan gelombang sangat dipengaruhi oleh kondisi angin lokal dan panjang lintasan angin (*fetch*). Pada Musim Timur, angin monsun tenggara bertiup lebih kuat dan memiliki lintasan yang lebih panjang dari arah Laut Arafura menuju Laut Banda sehingga menghasilkan seas dengan tinggi gelombang yang lebih besar.

Selain dipengaruhi oleh angin monsun, dinamika gelombang di Laut Banda juga dipengaruhi oleh kondisi perairan di sekitarnya. Habibie *et al.* (2018) menjelaskan bahwa Laut Arafura menerima pengaruh

kuat angin monsun tenggara sehingga berpotensi mentransmisikan energi gelombang menuju Laut Banda. Sebaliknya, pada Musim Barat propagasi gelombang cenderung melemah akibat keberadaan Pulau Papua dan gugusan kepulauan di Indonesia timur yang berfungsi sebagai penghalang alami terhadap penjalaran gelombang.

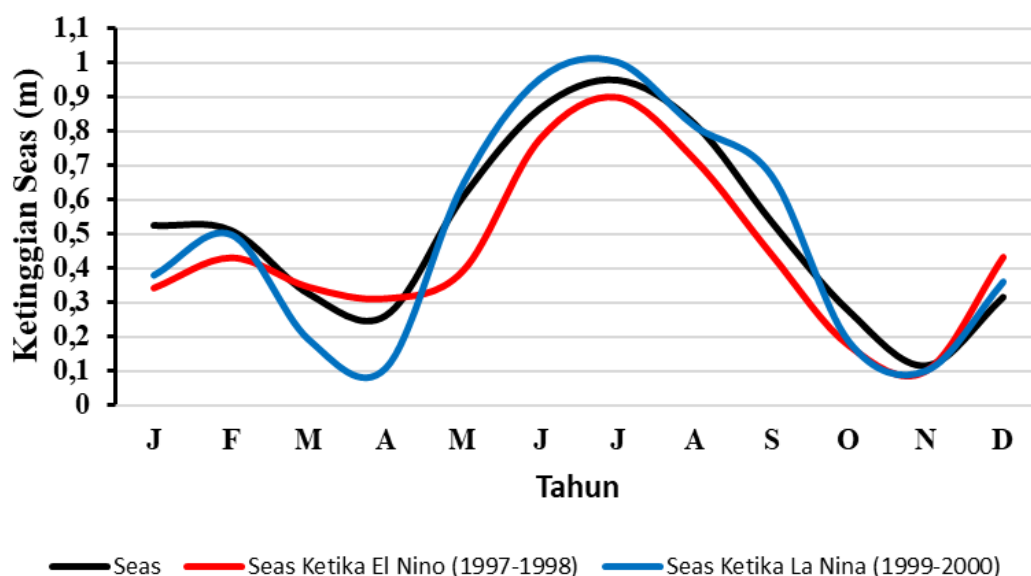
Keberadaan pulau-pulau tersebut juga memengaruhi proses pembentukan gelombang lokal. Taryono *et al.* (2022) menyatakan bahwa pulau dan gugusan kepulauan dapat mengurangi kecepatan angin serta membatasi panjang fetch, sehingga energi gelombang yang terbentuk menjadi lebih kecil. Oleh karena itu, tinggi gelombang seas dan swell di Laut Banda cenderung lebih besar pada Musim Timur dibandingkan Musim Barat, ketika angin monsun tenggara bertiup lebih kuat dan tidak banyak terhalang oleh daratan.

Variasi musiman tersebut menunjukkan bahwa karakteristik seas dan swell di Laut Banda sangat dipengaruhi oleh perubahan pola angin monsun. Namun demikian, selain variabilitas musiman, kondisi gelombang juga diperkirakan dipengaruhi oleh variabilitas iklim antar-tahunan, khususnya El Niño–Southern Oscillation (ENSO), yang dapat memodifikasi kekuatan angin monsun, sirkulasi atmosfer, serta kondisi oseanografi di Laut Banda. Oleh karena itu, analisis hubungan antara ENSO dengan karakteristik seas dan swell dibahas pada subbab berikutnya.

Hubungan ENSO terhadap Karakteristik Seas dan Swell di Laut Banda

Perbandingan tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*) tipe seas dan swell pada kondisi El Niño, La Niña, dan normal disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8, terlihat bahwa variabilitas ENSO memengaruhi karakteristik gelombang laut di Laut Banda. Secara umum, tinggi gelombang signifikan seas maupun swell cenderung lebih rendah pada fase El Niño dibandingkan pada fase La Niña. Perbedaan tersebut paling jelas terlihat pada Musim Timur, ketika angin monsun tenggara mencapai intensitas maksimum sehingga proses pembangkitan gelombang lokal berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, selama fase La Niña, tinggi gelombang seas dan swell cenderung meningkat hampir pada seluruh musim, terutama selama Musim Timur hingga awal Musim Peralihan II.

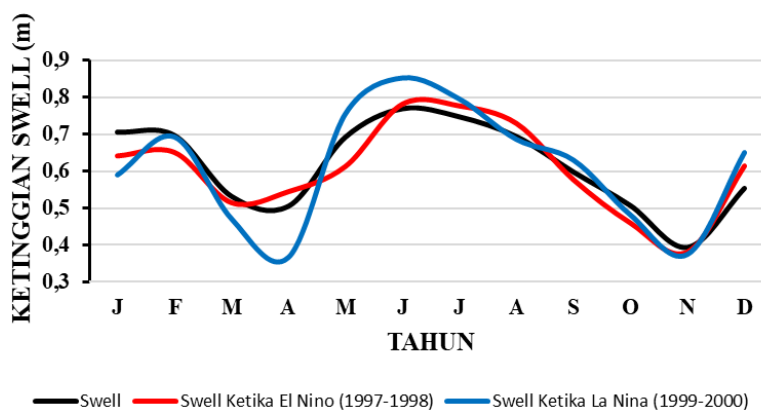
Untuk mengkuantifikasi hubungan tersebut, dilakukan analisis korelasi Pearson antara ENSO dengan tinggi gelombang seas dan swell, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara ENSO dan seas bervariasi menurut musim. Pada fase El Niño, korelasi negatif sangat kuat ditemukan pada Musim Peralihan II ($r = -0,9519$) dan Musim Timur ($r = -0,9493$), sedangkan pada Musim Barat terbentuk korelasi positif sangat kuat ($r = 0,9782$). Sebaliknya, selama fase La Niña, hubungan ENSO terhadap seas umumnya bersifat positif, dengan korelasi tertinggi terjadi pada Musim Barat ($r = 0,5710$), sementara musim lainnya menunjukkan hubungan yang relatif lemah.



Gambar 7. Grafik perbandingan ketinggian signifikan seas di Laut Banda ketika *El Niño*, *La Niña*, dan normal

Tabel 2. Korelasi ENSO–*seas*

Musim	El Niño– <i>seas</i>	Interpretasi	La Niña– <i>seas</i>	Interpretasi	El Niño– <i>swell</i>	Interpretasi	La Niña– <i>swell</i>	Interpretasi
Peralihan II	–0,9519	negatif sangat kuat	0,3409	positif lemah	–0,7824	negatif kuat	0,3747	positif lemah
Barat	0,9782	positif sangat kuat	0,5710	positif sedang	0,4655	positif sedang	0,8443	positif kuat
Peralihan I	–0,5474	negatif sedang	–0,2177	negatif lemah	–0,9831	negatif sangat kuat	–0,1165	negatif lemah
Timur	–0,9493	negatif sangat kuat	0,2455	positif lemah	–0,7559	negatif kuat	–0,1558	negatif lemah
Rata-rata	–0,3676	negatif lemah	0,2349	positif lemah	–0,5140	negatif sedang	0,2367	positif lemah



Gambar 8. Grafik perbandingan ketinggian signifikan *swell* di Laut Banda ketika *El Niño*, *La Niña*, dan normal

Pola yang hampir serupa juga diperoleh pada parameter swell. Pada fase El Niño, korelasi negatif sangat kuat ditemukan pada Musim Peralihan I ($r = -0,9831$), diikuti Musim Peralihan II ($r = -0,7824$) dan Musim Timur ($r = -0,7559$). Sebaliknya, selama fase La Niña, hubungan positif terkuat terjadi pada Musim Barat ($r = 0,8443$), sedangkan musim lainnya menunjukkan hubungan yang relatif lemah. Secara umum, korelasi rata-rata ENSO terhadap seas bersifat negatif lemah pada fase El Niño ($r = -0,3676$) dan positif lemah pada fase La Niña ($r = 0,2349$). Sementara itu, pada parameter swell, korelasi rata-rata menunjukkan hubungan negatif sedang selama El Niño ($r = -0,5140$) dan positif lemah selama La Niña ($r = 0,2367$). Perbedaan karakteristik tersebut berkaitan erat dengan perubahan sirkulasi atmosfer yang dipicu oleh ENSO. Pada fase El Niño, sirkulasi Walker melemah sehingga pusat konveksi bergeser ke Samudra Pasifik bagian tengah dan timur. Kondisi tersebut menyebabkan angin pasat dan sistem monsun di wilayah Indonesia ikut melemah sehingga transfer energi angin ke permukaan laut berkurang. Akibatnya, proses pembentukan wind waves (*seas*) menjadi kurang intensif dan tinggi gelombang cenderung menurun (Habibie *et al.*, 2018; Horhoruw *et al.*, 2015). Shah dan Sholehah (2021) juga menjelaskan bahwa pelemahan monsun selama kejadian El Niño, terutama pada musim peralihan, turut menyebabkan penurunan tinggi gelombang di wilayah Indonesia.

Sebaliknya, pada fase La Niña, sirkulasi Walker menguat sehingga aktivitas konveksi di wilayah Indonesia meningkat. Kondisi tersebut diikuti oleh penguatan angin pasat dan sistem monsun yang meningkatkan transfer momentum dari atmosfer ke permukaan laut. Akibatnya, pembentukan seas menjadi lebih intensif, sedangkan energi gelombang yang merambat dari wilayah sekitarnya turut meningkatkan tinggi swell (Habibie *et al.*, 2018; Horhoruw *et al.*, 2015).

Tabel 3. Korelasi ENSO–sea, *swell*, *angin*

Hubungan	El Niño	La Niña	Interpretasi
ENSO – Angin	-0,1885	0,2681	Lemah
ENSO – Seas	-0,3676	0,2349	Lemah
ENSO – Swell	-0,5140	0,2367	Sedang
Angin – Seas	0,9169	0,9233	Sangat kuat
Angin – Swell	0,8418	0,7056	Kuat

Meskipun demikian, hasil korelasi rata-rata menunjukkan bahwa hubungan langsung antara ENSO dengan parameter gelombang relatif lemah hingga sedang, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Korelasi ENSO terhadap angin hanya mencapai $r = -0,1885$ pada fase El Niño dan $r = 0,2681$ pada fase La Niña. Demikian pula korelasi ENSO terhadap seas berkisar antara $r = -0,3676$ hingga $0,2349$, sedangkan terhadap swell berkisar antara $r = -0,5140$ hingga $0,2367$. Sebaliknya, hubungan antara angin dan gelombang menunjukkan korelasi yang jauh lebih kuat, yaitu $r = 0,9169-0,9233$ untuk seas dan $r = 0,7056-0,8418$ untuk swell.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengaruh ENSO terhadap karakteristik gelombang di Laut Banda lebih banyak dimediasi oleh perubahan pola angin monsun dibandingkan melalui hubungan langsung. Dengan kata lain, ENSO memengaruhi kondisi atmosfer melalui perubahan sirkulasi Walker dan angin pasat, yang selanjutnya mengubah intensitas angin monsun di Laut Banda. Perubahan angin inilah yang berperan sebagai pengendali utama pembentukan seas dan swell, sehingga hubungan antara angin dan gelombang menjadi jauh lebih kuat dibandingkan hubungan langsung antara ENSO dan gelombang.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variabilitas ENSO tidak hanya memengaruhi suhu permukaan laut dan proses *upwelling*, tetapi juga memengaruhi dinamika gelombang laut melalui mekanisme perubahan sirkulasi atmosfer dan kekuatan angin monsun. Oleh karena itu, informasi mengenai hubungan ENSO, angin, dan gelombang laut di Laut Banda dapat menjadi dasar dalam mendukung kegiatan pelayaran, perikanan, serta mitigasi risiko bencana hidrometeorologi di wilayah Indonesia timur.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik gelombang laut tipe seas dan swell di Laut Banda memiliki pola variabilitas musiman yang berbeda. Gelombang seas cenderung berkembang mulai akhir Musim Peralihan I hingga awal Musim Peralihan II, dengan tinggi gelombang signifikan maksimum terjadi pada Musim Timur, khususnya bulan Juli, seiring dengan menguatnya angin monsun tenggara. Sebaliknya, swell menunjukkan dominasi yang lebih besar pada akhir Musim Peralihan II, Musim Barat, dan awal Musim Peralihan I sebagai akibat pengaruh propagasi gelombang dari perairan di sekitarnya. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa variabilitas El Niño–Southern Oscillation (ENSO) memengaruhi karakteristik seas dan swell di Laut Banda. Selama fase El Niño, tinggi gelombang cenderung lebih rendah dibandingkan pada fase La Niña, terutama pada Musim Timur. Kondisi tersebut berkaitan dengan pelemahan sirkulasi Walker yang menyebabkan berkurangnya kekuatan angin pasat dan angin monsun, sehingga energi angin yang ditransfer ke permukaan laut menjadi lebih kecil. Sebaliknya, pada fase La Niña, penguatan sirkulasi Walker meningkatkan intensitas angin monsun sehingga pembentukan gelombang lokal (*seas*) maupun propagasi *swell* menjadi lebih kuat. Analisis korelasi menunjukkan bahwa hubungan langsung antara ENSO dengan seas dan swell relatif lemah hingga sedang, sedangkan hubungan antara angin dan gelombang tergolong kuat hingga sangat kuat. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengaruh ENSO terhadap karakteristik gelombang di Laut Banda lebih banyak dimediasi oleh perubahan pola angin monsun daripada melalui pengaruh langsung. Temuan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme pengendalian gelombang laut di wilayah Laut Banda. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi ilmiah dalam mendukung prakiraan kondisi gelombang laut, keselamatan pelayaran, operasi perikanan, serta pengelolaan wilayah pesisir di Laut Banda dan wilayah Indonesia timur. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya mengenai pengaruh variabilitas iklim global terhadap dinamika gelombang laut di perairan Indonesia dengan memanfaatkan data pengamatan maupun model oseanografi beresolusi lebih tinggi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan informasi mengenai karakteristik spasial dan temporal *seas*

dan *swell* di Laut Banda, tetapi juga memperjelas peran ENSO melalui perubahan pola angin monsun sebagai mekanisme utama yang mengontrol variabilitas gelombang laut di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, A. R., Wirasatriya, A., & Widiaratih, R. 2023. Analisis ENSO terhadap Variabilitas Kedalaman Mixed Layer di Laut Maluku. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(1): 36–42.
- Aramburo, D., Montoya, R. D., & Osorio, A. F. 2022. Impact of the ENSO Phenomenon on Wave Variability in the Pacific Ocean for Wind Sea and Swell Waves. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 100: 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2022.101328>
- Ethamony, P. V., Rashmi, R., Samiksha, S. V., & Aboobacker, V. M. 2013. Recent Studies on Wind Seas and Swells in the Indian Ocean: A Review. *International Journal of Maritime Engineering*, 4(1): 63–78. <https://doi.org/10.1260/1759-3131.4.1.63>
- Habibie, M. N., & Fitria, W. 2018. Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang Signifikan di Indonesia. *Jurnal Segara*, 14(3): 159–168.
- Hatmaja, R. B., Wishu, U. J., Radjawane, I. M., & Al Tanto, T. 2019. Correlation and Coherence Analysis between Sea Surface Temperature (SST) and Surface Wind in the Equatorial Western Sumatra Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1): 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012003>
- Horhoruw, S. M., Atmadipoera, A. S., Purba, M., & Purwandana, A. 2015. Current Structure and Spatial Variation of Indonesian Throughflow in Makassar Strait under Ewin 2013. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 20(2): 87–100.
- Hutahean, W., & Wilson, R. E. 1992. Upper Layer Circulation in the Banda Sea in Response to the Onset of Monsoon Winds. *Marine Research in Indonesia*, 28. <https://doi.org/10.14203/mri.v28i0.415>
- Kämpf, J., & Chapman, P. 2016. Upwelling Systems of the World. Springer Nature.
- 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>
- Lin, Y., Oey, L. Y., & Orfila, A. 2019. Two 'Faces' of ENSO-Induced Surface Waves during the Tropical Cyclone Season. *Progress in Oceanography*, 175: 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.03.004>
- Nurafifah, U. O., Zainuri, M., & Wirasatriya, A. 2022. Pengaruh ENSO dan IOD terhadap Distribusi Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a pada Periode Upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(3): 74–85.
- Purwanto, 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.
- Rahayu, S. D., Setiyono, H., & Indrayani, E. 2023. Hubungan Kecepatan Angin dan Luasan Upwelling Intensitas Kuat di Perairan Selatan Jawa pada Kejadian La Niña 2010, Normal 2013 dan El Niño 2015. *[nama jurnal tidak tercantum pada sumber — mohon dilengkapi]*, 5(1): 7–17.
- Ramadhan, F., Kunarso, K., Wirasatriya, A., Maslukah, L., & Handoyo, G. 2021. Perbedaan Kedalaman dan Ketebalan Lapisan Termoklin pada Variabilitas ENSO, IOD dan Monsun di Perairan Selatan Jawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(2): 214–223.
- Risnayah, S. 2021. Dampak La Niña 2020–2021 terhadap Curah Hujan di Sulawesi Tenggara. *Buletin GAW Bariri*, 2(2): 97–104.
- Rizal, A. M., & Ningsih, N. S. 2022. Description and Variation of Ocean Wave Energy in Indonesian Seas and Adjacent Waters. *Ocean Engineering*, 251: 111086. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111086>
- Syah, A. F., & Sholehah, S. 2021. Thermal Front Variability during the El Niño Southern Oscillation (ENSO) in the Banda Sea Using Remotely Sensed Data. *Journal of Marine Science*, 3(2): 1–7.
- Taryono, T., Sofian, I., Kuswardani, A. R. T. D., & Alam, T. M. 2022. Analisis Panjang dan Tinggi Gelombang untuk Operasi KRI TNI-AL di Perairan Indonesia. *Jurnal Chart Datum*, 2(1): 72–87.
- Trisianto, G., Wulandari, S. Y., Suryoputro, A. A. D., Handoyo, G., & Zainuri, M. 2021. Studi Variabilitas Upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1): 25–35.