

Analisis Variabilitas Tinggi Gelombang Saat ENSO Kuat di Perairan Raja Ampat

Haris Munandar Gultom^{1*}, Elis Indrayanti², Muhammad Helmi²

¹Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Departemen Oseanografi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Jacobus Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

Email: *haris.munandar.gultom@gmail.com

Abstrak

Kawasan Konservasi Perairan Raja Ampat merupakan destinasi wisata bahari yang dikenal karena keindahan perairan dan terumbu karangnya. Iklim merupakan salah satu penggerak utama dalam pariwisata internasional. Gelombang tinggi dan kecepatan angin yang ekstrem menimbulkan risiko besar terhadap keselamatan pelayaran di perairan Indonesia. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui variabilitas tinggi gelombang, anomali tinggi gelombang pada tahun El Niño Kuat dan La Niña Kuat di Perairan Raja Ampat. Metode yang digunakan yaitu pendekatan deskriptif-kuantitatif, dengan metode analisis statistik regresi dan korelasi pada data deret waktu selama 43 tahun dari tahun 1980-2023. Data yang digunakan diakses dari Marine Copernicus yang berupa hasil data model platform NEMO pada permukaan laut oleh ECMWF ERA-Interim yang kemudian dianalisis ulang oleh ERA5, resolusi horizontal dengan reanalysis $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (atmosphere), $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (ocean waves) mean, spread and members: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (atmosphere), $1^\circ \times 1^\circ$ (ocean waves). Resolusi temporal yang digunakan adalah temporal dengan format file GRIB dan update frekuensi bulanan. Hasil dari penelitian ini yaitu El Niño kuat memperkuat angin timuran (JJA–SON) dan meningkatkan tinggi gelombang di wilayah barat dan selatan Raja Ampat (anomali positif hingga +0.3 m). Pada La Niña kuat menyebabkan penurunan tinggi gelombang di DJF dan SON. Pada DJF, baik El Niño Kuat maupun La Niña Kuat menyebabkan penurunan tinggi gelombang, sehingga laut lebih tenang dibanding kondisi normal. Pada MAM, El Niño Kuat meningkatkan tinggi gelombang akibat penguatan angin barat–laut, sedangkan La Niña Kuat menurunkan tinggi gelombang karena melemahnya angin. Pola angin musiman mempengaruhi variasi tinggi gelombang di perairan Raja Ampat.

Kata kunci: Angin, ENSO, Tinggi Gelombang

Abstract

Analysis of Significant Wave Height Variability During Strong ENSO in Raja Ampat Waters

The Raja Ampat Marine Protected Area is a marine tourism destination well known for the beauty of its waters and coral reefs. Climate is one of the main drivers of international tourism. High waves and extreme wind speeds pose significant risks to navigation safety in Indonesian waters. The objective of study is to analyze the variability and anomalies of wave height during strong El Niño and strong La Niña events in the waters of Raja Ampat. The study employed a descriptive–quantitative approach using statistical regression and correlation analyses on a 43-year time series dataset from 1980 to 2023. The data were obtained from Marine Copernicus, derived from the NEMO ocean model and ECMWF ERA-Interim surface datasets, which were later reanalyzed using ERA5. The dataset has a horizontal resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ for atmospheric variables and $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ for ocean waves. Mean, spread, and ensemble members are available at $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ for the atmosphere and $1^\circ \times 1^\circ$ for ocean waves. The temporal resolution used in this study is monthly, with GRIB file format and regular monthly updates. The results indicate that strong El Niño events strengthen easterly winds during the JJA–SON seasons and increase wave heights in the western and southern waters of Raja Ampat, with positive anomalies reaching up to +0.3 m. In contrast, strong La Niña events lead to a decrease in wave heights during the DJF and SON seasons. During DJF, both strong El Niño and strong La Niña events tend to reduce wave heights, resulting in calmer sea conditions compared to normal conditions.

During MAM, strong El Niño increases wave heights due to the strengthening of northwesterly winds, whereas strong La Niña reduces wave heights as a result of weakened winds. Seasonal wind patterns influence the variations of wave height in Raja Ampat Waters.

Keywords: *Wind, ENSO, Wave Height*

PENDAHULUAN

Konservasi laut dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan di Raja Ampat adalah prioritas tinggi bagi pemerintah nasional, provinsi dan kabupaten (kkprajaampat, 2025). Kawasan konservasi perairan Raja Ampat di Kabupaten Raja Ampat merupakan destinasi wisata bahari berbasis ekowisata yang terdiri dari sekelompok pulau yang terletak di Provinsi Papua Barat - Indonesia. Keindahan pulau ini menjadikan Raja Ampat sebagai salah satu ikon pariwisata bawah laut paling populer di Indonesia dan dunia internasional yang dikenal karena keindahan perairan dan terumbu karangnya. Raja Ampat menawarkan berbagai aktivitas seperti kayaking, snorkeling, diving, trekking, kunjungan desa, mengunjungi pulau-pulau kecil, dan ekspedisi hutan untuk melihat flora dan fauna yang ada di wilayah ini (Larasati dan Aminun, 2023).

Iklim merupakan salah satu penggerak utama dalam pariwisata internasional (Aguiló *et al.*, 2005). Iklim merupakan faktor penarik bagi wisatawan yang ingin berelaksasi pada tempat yang memiliki iklim yang lebih nyaman daripada tempat tinggalnya (Suwanto, 2011). Gelombang tinggi dan kecepatan angin yang ekstrem menimbulkan risiko besar terhadap keselamatan pelayaran di perairan Indonesia (Fathurohman *et al.*, 2025). Pulau-kecil yang rentan terhadap gelombang dan perubahan iklim mengalami dampak pada pariwisata, termasuk aspek keamanan dan kenyamanan wisatawan (Kurniawan, 2016). Salah satu variabilitas iklim yang bisa mempengaruhi kondisi oseanografi yaitu fenomena El-Niño Southern Oscillation (ENSO). Fenomena ini terjadi karena adanya penyimpangan kondisi interaksi antara laut dan atmosfer sepanjang Samudera Pasifik sekitar ekuator dari keadaan normalnya sehingga mempengaruhi variabilitas iklim di wilayah ekuator samudera Pasifik dan beberapa bagian bumi (Handoko *et al.*, 2019).

Iklim di Samudera Pasifik dapat bervariasi dalam tiga kondisi (fase) yaitu fase Netral, El Nino, dan La Nina. El Nino menunjukkan kondisi anomali suhu permukaan laut di Samudera Pasifik ekuator bagian timur dan tengah yang lebih panas dari normalnya, sementara La Nina menunjukkan kondisi anomali suhu permukaan laut di Samudera Pasifik ekuator bagian timur dan tengah yang lebih dingin dari normalnya. Pada fase El Nino Indonesia mengalami peningkatan risiko kekeringan dan pada saat fase La Nina Indonesia mengalami peningkatan risiko banjir yang lebih tinggi (BMKG, 2025).

Mengetahui karakteristik gelombang seperti tinggi, periode dan arah gelombang merupakan karakteristik fisik laut yang sangat penting dalam merencanakan perjalanan laut, sesampai keselamatan bisa terjamin (Kurniawan dan Khotimah, 2016). Karakteristik gelombang sangat penting dalam berbagai bidang seperti perkapalan, industri, pariwisata dan keselamatan struktur lepas pantai (Habibie *et al.* 2018). Meningkatnya ketergantungan ekonomi daerah pada pariwisata bahari, sehingga fluktuasi kondisi laut (gelombang tinggi, angin kuat, cuaca ekstrem) akan berdampak langsung pada aktivitas wisata (Jhuswanto dan Nurul, 2023). Pengembangan pariwisata berkelanjutan di Raja Ampat membutuhkan tata kelola destinasi yang mampu mengantisipasi faktor-faktor biofisik laut yang dapat memengaruhi kenyamanan dan keselamatan wisatawan (Huwae *et al.* 2018). Cuaca ekstrem dan gelombang tinggi yang tidak terduga menimbulkan risiko besar terhadap kegiatan pelayaran di perairan Indonesia, khususnya di jalur laut antarpulau (Fathurohman *et al.* 2025). Secara Klimatologi gelombang dipengaruhi oleh faktor cuaca, di Indonesia sendiri sangat dipengaruhi oleh musim barat, timur maupun musim peralihan.

Penelitian oleh Purwanto *et al.*, (2021) telah menjabarkan variabilitas musiman gelombang pada perairan Indonesia dengan penekanan studi pada cakupan regional. Sedangkan penelitian ini fokus pada analisis variabilitas dan anomali tinggi gelombang di Perairan Raja Ampat menggunakan data reanalisis ERA5 selama periode panjang (1980 - 2023) dengan menekankan respons musiman tinggi gelombang terhadap kejadian ENSO ekstrem (El Nino kuat dan La Nina kuat). Pendekatan ini memberikan pemahaman baru mengenai dinamika gelombang laut di Raja Ampat serta implikasinya terhadap keselamatan pelayaran dan pengelolaan pariwisata bahari berkelanjutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk referensi penelitian selanjutnya maupun pihak berwenang yang membutuhkan informasi tersebut dan untuk mendukung keamanan maritim di wilayah Indonesia.

MATERI DAN METODE

Area Penelitian

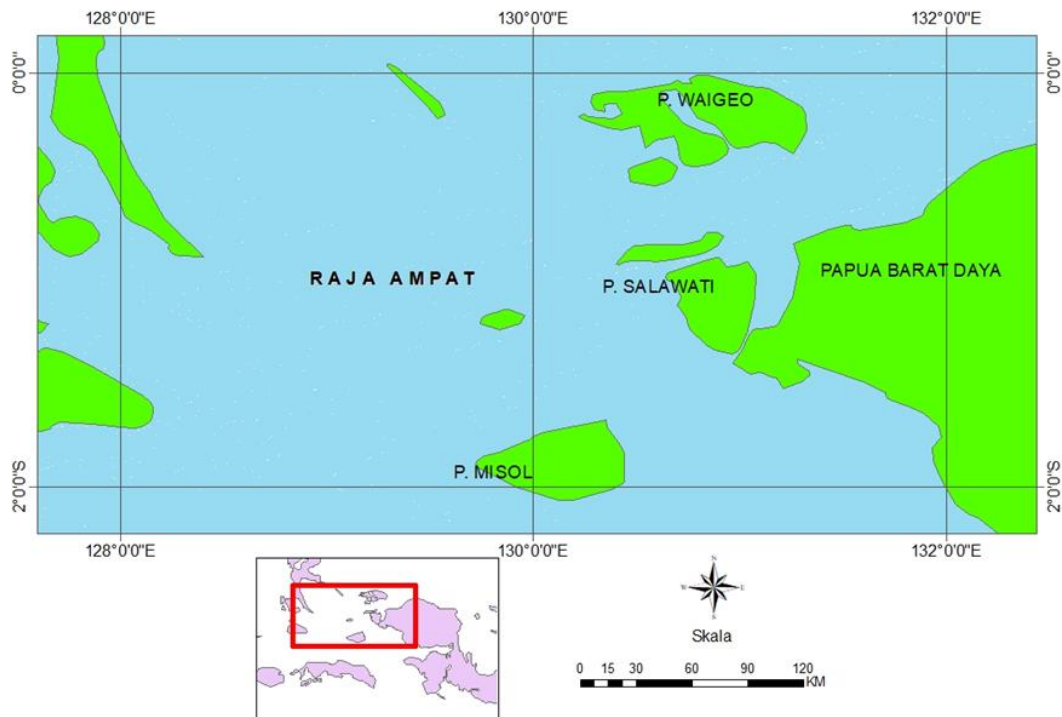
Penelitian dilakukan di Perairan Raja Ampat pada koordinat 00° LU – 02° LS dan 128° BT – 132,5° BT, yang mencakup perairan utama Raja Ampat dan sekitarnya (Gambar 1).

Materi Penelitian

Penelitian yang digunakan berupa data seperti yang disajikan pada Tabel 1. Analisis dilakukan menggunakan data jangka panjang periode 1980–2023 untuk melihat variasi klimatologis, musiman, dan *interannual* secara komprehensif. Fenomena iklim yang dianalisis dalam penelitian ini adalah El Niño kuat dan La Niña kuat, yang ditentukan berdasarkan nilai Oceanic Niño Index (ONI) dengan ambang $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

Tabel 1. Data Penelitian

Jenis Data	Resolusi & Format	Sumber
Tinggi gelombang	Resolusi horizontal: 0.25° x 0.25° (atmosfer), 0.5° x 0.5° (elombang laut) Temporal: bulanan Format: GRIB	Marine Copernicus - hasil model NEMO permukaan laut oleh ECMWF ERA-Interim yang dianalisis ulang oleh ERA5
ONI - Oceanic Nino Index	Bulanan	NOAA - Climate Prediction Centre (CPC)
Angin	Resolusi horizontal: 0.25° x 0.25° (atmosfer), 0.5° x 0.5° (elombang laut) Temporal: bulanan Format: GRIB	Marine Copernicus - data model NEMO permukaan laut oleh ECMWF ERA-Interim yang dianalisis ulang oleh ERA5



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Perairan Raja Ampat

Metode Penelitian

Pengumpulan data secara kuantitatif meliputi data tinggi gelombang, angin dan indeks variabilitas iklim ONI. Data yang dihasilkan kemudian diolah untuk memperoleh gambaran klimatologis tinggi gelombang secara spasial selama periode 1980 - 2023, selanjutnya dihitung rata-rata klimatologis musiman di musim Desember-Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA), September-Oktober-November (SON). Hasil perhitungan dikaitkan dengan pengaruh dari variabilitas iklim ENSO (El Nino Kuat dan La Nina Kuat). Berdasarkan tabel indeks ONI NOAA maka terjadi El Nino kuat dengan nilai $\geq +1.5^{\circ}\text{C}$ pada tahun 1982, 1983, 1987, 1991, 1992, 1997, 1998, 2015, 2016, dan 2023. Sementara La Nina kuat dengan nilai $\leq -1.5^{\circ}\text{C}$ terjadi pada tahun 1988, 1989, 1998, 1999, 2000, 2007, 2008, 2010, dan 2011. Selanjutnya dilakukan perhitungan anomali untuk mengetahui bagaimana fenomena ENSO (El Nino Kuat dan La Nina Kuat) mempengaruhi tinggi gelombang.

Analisis Tinggi Gelombang

Metode pengolahan data tinggi gelombang memiliki beberapa tahapan di dalamnya. Data tinggi gelombang yang telah diperoleh kemudian akan dilakukan kondisi klimatologis tinggi gelombang dengan menghitung rata-rata bulanan untuk periode 1980 - 2023. Kemudian data rata-rata bulanan klimatologis tinggi gelombang. dibuat gambar klimatologis bulanan. Persamaan yang digunakan untuk menentukan kondisi klimatologis tinggi gelombang adalah sebagai berikut (Arguez et al, 2011):

$$\bar{X}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{m,i}$$

Dengan \bar{X}_m yang merupakan rata-rata bulanan/klimatologi, n merupakan banyaknya komposit data pada periode bulanan atau klimatologi, $i=1$ merupakan 1 hari/bulan ke-1, $X_{m,i}$ merupakan nilai tinggi gelombang pada bulan ke- i dalam tahun ke- m .

Data tinggi gelombang yang telah dilakukan komposit akan diolah untuk mencari rata-rata klimatologis musiman di musim DJF, MAM, JJA, SON. Persamaan yang digunakan untuk menentukan rata-rata klimatologis musiman tinggi gelombang adalah sebagai berikut (Arguez et al., 2011):

$$\bar{X}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{s,i}$$

Dengan \bar{X}_s merupakan rata-rata klimatologis musiman, $X_{s,i}$ merupakan nilai parameter iklim pada musim s tahun ke- i , n jumlah tahun pengamatan.

Data tinggi gelombang yang telah dilakukan komposit akan diolah untuk mencari anomali data tinggi gelombang musiman. Hal ini dilakukan karena pada saat terjadi fenomena ENSO (El Nino Kuat dan La Nina Kuat), pengaruh yang langsung terdampak pada suatu perairan yaitu adanya anomali yang terjadi pada tinggi gelombang di wilayah perairan tersebut. Nilai anomali tinggi gelombang dihitung menggunakan persamaan berikut (Philander, 1992):

$$\Delta SPL = SPL_a - SPL_m$$

Dengan Δ tinggi gelombang merupakan nilai anomali tinggi gelombang pada tempat yang bersangkutan (m), tinggi gelombang_a merupakan nilai tinggi gelombang aktual pada tempat yang bersangkutan (m), tinggi gelombang_m merupakan nilai tinggi gelombang rerata (mean) dari series data yang relatif panjang pada tempat yang bersangkutan (m).

Analisis Statistik

Analisis statistik regresi dilakukan untuk mengetahui pengaruh El Nino kuat dan La Nina kuat (berdasarkan indeks ONI) terhadap tinggi gelombang. Persamaan yang digunakan yaitu regresi linier sederhana sebagai berikut (Nazir, 2003):

$$Y = a + bX$$

Dengan Y anomali tinggi gelombang saat kejadian El Niño kuat dan la nina kuat, a merupakan nilai intercept atau perpotongan dengan sumbu tegak, b merupakan kemiringan atau gradient, X merupakan indeks ONI. Nilai anomali tinggi gelombang dan indeks ONI yang digunakan dalam analisis adalah nilai bulanan.

Dilakukan pengolahan data untuk mengetahui seberapa besar hubungan antara ENSO terhadap tinggi gelombang menggunakan metode statistik Analisis korelasi. Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (Pearson, 1895):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Dengan r merupakan koefisien korelasi, x_i, y_i merupakan nilai ke- i dari 2 variabel, \bar{x}, \bar{y} merupakan rata-rata dari masing-masing variable, n merupakan jumlah pasangan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Klimatologis Tinggi Gelombang Tahun 1980-2023

Rata-rata tinggi gelombang di Perairan Raja Ampat tahun 1980-2023 disajikan pada Gambar 2. Pada musim DJF terlihat peningkatan tinggi gelombang yang signifikan terutama di bagian utara dan barat Raja Ampat, mencapai > 2.5 meter bahkan mendekati 3.0 meter di perairan terbuka yang berhadapan langsung dengan Laut Seram dan Samudra Pasifik barat. Kondisi ini disebabkan oleh dominasi angin monsun barat, yang bertiup kuat dari arah barat-laut menuju timur - tenggara. Angin ini membawa energi kinetik tinggi ke permukaan laut, menghasilkan gelombang signifikan terutama di sisi barat dan utara wilayah. Hal ini sesuai dengan penelitian Purwantoro *et al.*, (2021) yang mengatakan musim barat laut (*Northwest Monsoon* - DJF) dominan memengaruhi tinggi gelombang di Laut Cina Selatan dan sebagian utara Papua.

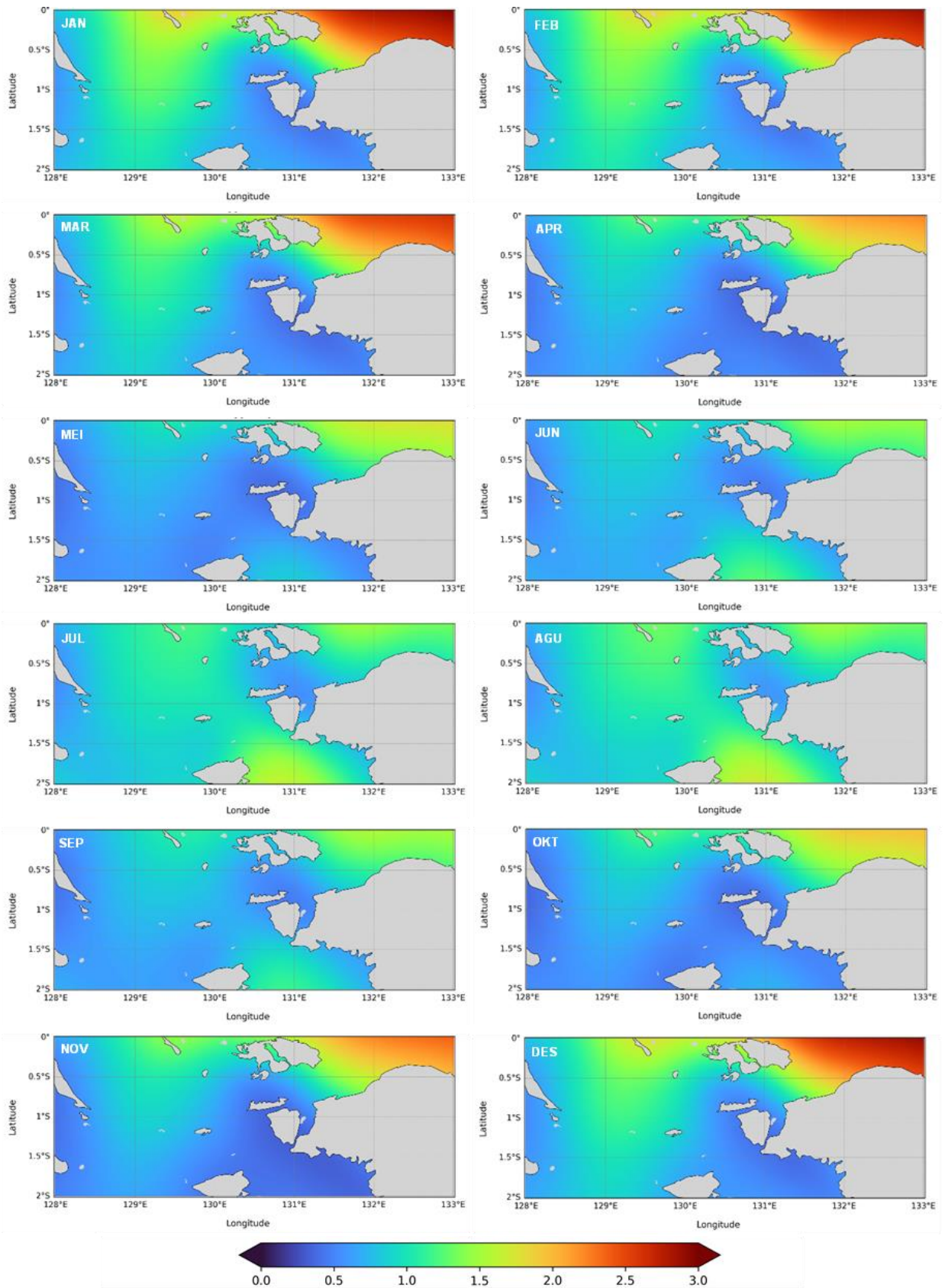
Pada musim MMA, tinggi gelombang mulai menurun secara gradual hingga berada pada kisaran 0.5 - 1.5 meter dan di sebagian besar wilayah menunjukkan periode laut relatif tenang. Hal ini sesuai dengan penelitian Ningsih *et al.*, (2023) yang mengatakan masa peralihan (Maret - Mei & September - November) menunjukkan gelombang menurun (< 0.8 m), sehingga kondisi laut relatif aman untuk kegiatan laut terbuka. Sedangkan pada musim JJA nampak puncak gelombang tinggi di Selatan dengan nilai 1.0 - 1.4 m. Musim timur (*SE trade winds*) aktif dengan angin dari tenggara menghasilkan gelombang tinggi terutama di perairan selatan dan barat Raja Ampat, hal ini sesuai dengan penelitian Permana *et al.*, (2016) yang mengatakan arah angin musiman memengaruhi arah dan tinggi gelombang. Tinggi gelombang kembali meningkat di bagian selatan, terutama akibat monsun timur yang membawa angin kencang dari Australia. Puncak gelombang terlihat pada Juli - Agustus, khususnya di bagian selatan dan timur kepulauan.

Tinggi gelombang pada musim SON mulai melemah dengan nilai 0.5–1 m yang merupakan awal peralihan ke musim barat dimana gelombang mulai menurun tapi masih cukup signifikan. Sementara pada bulan November-Desember gelombang relatif rendah, dimana cuaca cenderung tenang dan cocok untuk pariwisata laut. Hal ini sesuai dengan penelitian Fadlan *et al.*, (2017) yang mengatakan bahwa gelombang terendah sering tercatat pada Oktober - November (1.25 m), selaras dengan tren di Papua.

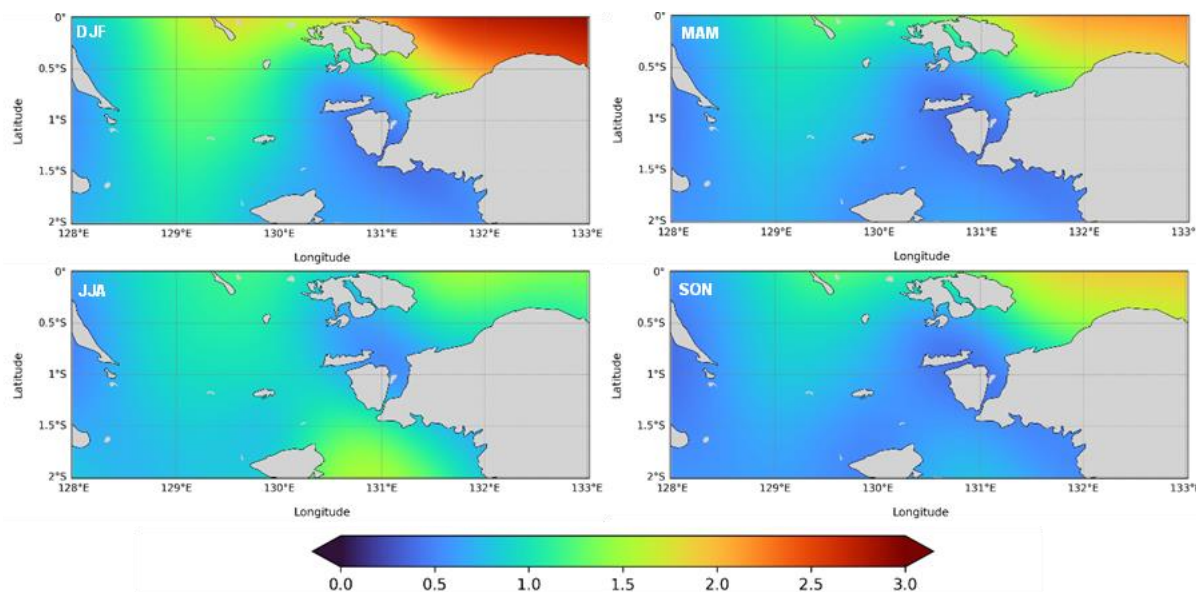
Distribusi spasial menunjukkan bahwa wilayah utara dan barat (berhadapan langsung dengan Laut Halmahera dan Pasifik barat) selalu menunjukkan nilai gelombang lebih tinggi, baik pada musim barat maupun peralihan. Wilayah selatan dan timur (terlindung oleh pulau besar seperti Misool dan Salawati) menunjukkan nilai lebih rendah, < 1 meter hampir sepanjang tahun. Variasi klimatologis tinggi gelombang di perairan Raja Ampat sepanjang tahun 1980 - 2023 menunjukkan keterkaitan yang jelas dengan fenomena ENSO, di mana pada periode El Niño kuat terjadi peningkatan intensitas angin timuran sehingga memicu kenaikan tinggi gelombang di musim timur (JJA - SON), sedangkan pada fase La Niña kuat, pelemahan angin baratan pada musim hujan (DJF - MAM) menyebabkan penurunan tinggi gelombang, meskipun pada puncak monsun timur tinggi gelombang tetap dapat meningkat akibat penguatan angin tenggara.

Variasi Musiman Tinggi Gelombang Tahun 1980-2023

Variasi Musiman tinggi gelombang tahun 1980 – 2023 ditunjukkan pada Gambar 3. Variasi musiman tinggi gelombang pada DJF merupakan gelombang tertinggi sepanjang tahun mencapai 2.5 - 3.0 meter terutama di bagian utara dan barat Raja Ampat, yang berhadapan langsung dengan Laut Halmahera dan Laut Seram.



Gambar 2. Rata-Rata Klimatologis Tinggi Gelombang Tahun 1980-2023 (m)



Gambar 3. Variasi Musiman Tinggi Gelombang Tahun 1980-2023 (m)

Dominasi angin monsun barat laut yang bertiup dari Asia menuju Australia membawa massa udara lembap dan kuat. Dampaknya adalah aktivitas pelayaran dan wisata bahari terganggu, dengan resiko gelombang tinggi meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian Purwanto *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa khususnya selama DJF, tinggi gelombang tertinggi terjadi di Laut Cina Selatan, namun pula memberikan dampak pada perairan utara Papua/Raja Ampat termasuk peningkatan gelombang > 1.2 m.

Variasi Musiman tinggi gelombang pada MAM yaitu gelombang melemah (0.4 - 0.8 m). pada musim ini cuaca cenderung lebih stabil dimana angin lemah dan arah angin cenderung bervariasi (tidak dominan dari satu arah), sehingga pembangkitan gelombang tidak efektif. Periode laut tenang ini mendukung aktivitas wisata bahari dan navigasi laut, terutama di perairan dalam dan antar pulau. Hal ini sesuai dengan penelitian Kurniawan *et al.*, (2011) yang mengatakan bahwa gelombang rata-rata terendah terjadi selama transisi musiman, yaitu MAM dan SON, dibandingkan dengan musim DJF dan JJA.

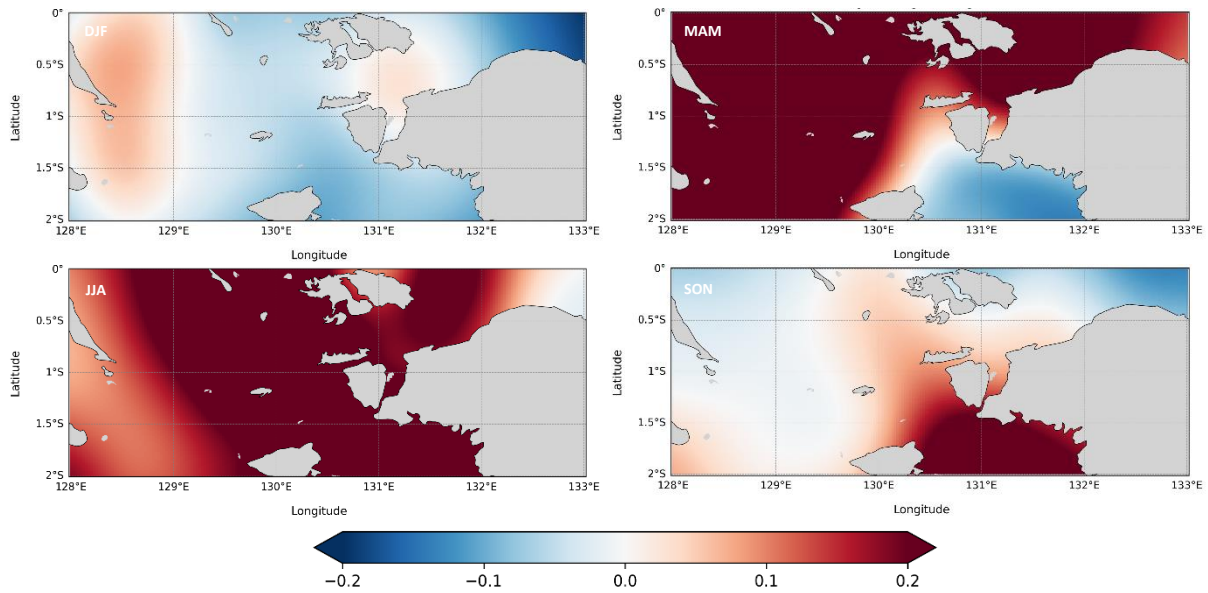
Variasi musiman tinggi gelombang pada JJA yaitu gelombang kembali meningkat di bagian selatan dan barat Raja Ampat (1.0 - 1.5 m) yang disebabkan oleh monsun Australia yang menghasilkan angin timur kuat dan konsisten dan sering terjadi gelombang dari selatan (swell dari Samudera Pasifik atau Laut Banda). Hal ini sesuai dengan penelitian Kurniawan *et al.*, (2011) yang mengatakan bahwa Gelombang rata-rata tertinggi terjadi di Juli (JJA)—setara dengan gelombang DJF, jauh melebihi periode peralihan (MAM, SON). Variasi Musiman tinggi gelombang pada SON yaitu gelombang mulai menurun lagi dimana peralihan angin timur ke barat yang ditandai dengan turunnya kecepatan angin permukaan sehingga laut mulai tenang dan cocok untuk wisata bahari dan perikanan tradisional. Hal ini sesuai dengan penelitian Zikra & Putika (2015), yang mengatakan bahwa periode September–November ditandai dengan penurunan signifikan dalam kecepatan angin dan tinggi gelombang signifikan menunjukkan fase transisi yang lebih tenang dimana gelombang rata-rata mencatat nilai terendah (≤ 0.6 m) dan ideal untuk mobilitas maritim dan wisata.

Anomali Tinggi Gelombang Saat El Nino Kuat

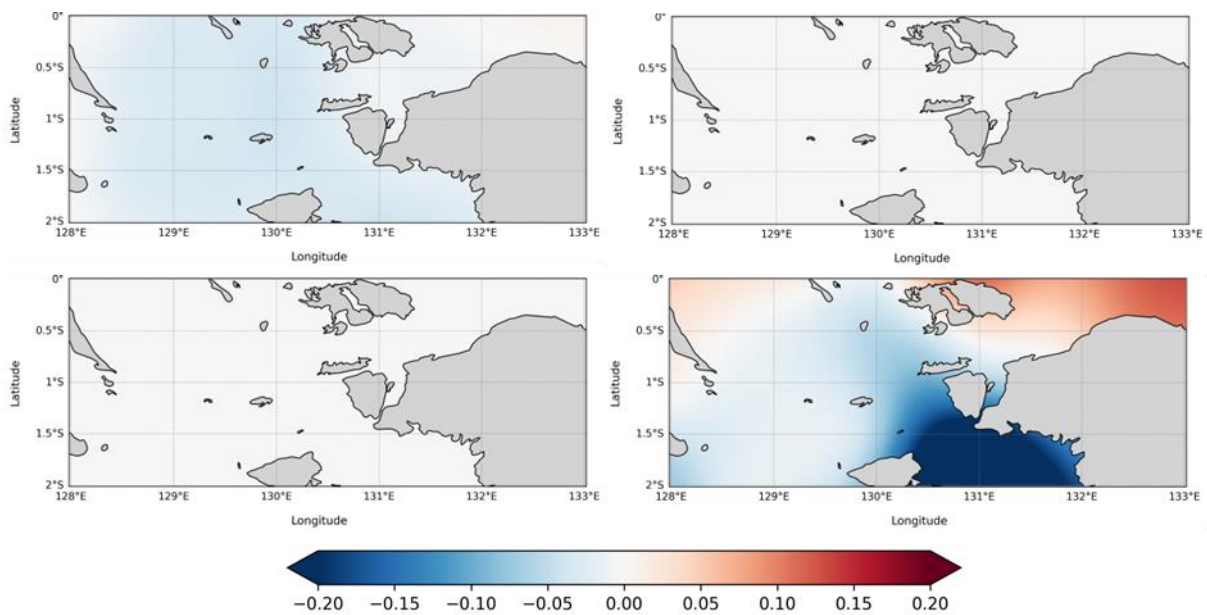
Gambar 4 menunjukkan pada periode DJF anomali negatif di bagian timur Raja Ampat dan anomali positif lemah di bagian barat. Anomali positif tinggi gelombang (+0.05 hingga +0.15 m). El Niño kuat pada DJF meningkatkan gelombang di sisi timur perairan Raja Ampat, yang berhadapan langsung dengan Samudra Pasifik barat. Gelombang barat dan utara Papua sedikit meningkat, sedangkan beberapa wilayah menunjukkan penurunan kecil. Kondisi ini dapat memengaruhi navigasi laut dan aktivitas nelayan secara lokal. Hal ini sesuai dengan penelitian (Wyrtki, 1961) yang mengatakan bahwa El Niño dapat mengubah pola arus dan angin musiman yang akhirnya berdampak pada pembentukan gelombang di perairan Indonesia timur.

Periode MAM adalah musim dengan anomali gelombang paling tinggi saat El Niño, didorong oleh kombinasi sirkulasi atmosfer El Niño dan pengaruh transisi monsun. anomali sangat positif (> +0.2 m). periode

MAM merupakan fase transisi ketika angin barat mulai melemah, tetapi pola atmosfer El Niño masih bertahan sehingga menimbulkan ketidakstabilan laut-atmosfer dan memperbesar gelombang lokal. Hal ini sesuai dengan penelitian Sukresno *et al.*, (2018) yang mengatakan bahwa selama El Niño kuat, anomali tinggi gelombang di Indonesia timur bersifat variatif: positif saat MAM. Periode JJA anomali positif sangat kuat dan merupakan periode gelombang tertinggi selama El Niño kuat dengan nilai lebih dari 0.2 m. Dampak di wilayah perairan Raja Ampat berupa peningkatan sedang pada tinggi gelombang, merata di hampir seluruh perairan. El Niño tetap meningkatkan gelombang di musim timur, tetapi intensitasnya lebih rendah dibanding MAM. Periode SON anomali negatif, -0.05 hingga -0.1 m, Hal ini menunjukkan penurunan tinggi gelombang saat SON dalam fase El Niño.



Gambar 4. Anomali Tinggi Gelombang Saat El Nino Kuat (m)



Gambar 5. Anomali Tinggi Gelombang Saat La Nina Kuat (m)

Anomali Tinggi Gelombang Saat La Nina Kuat

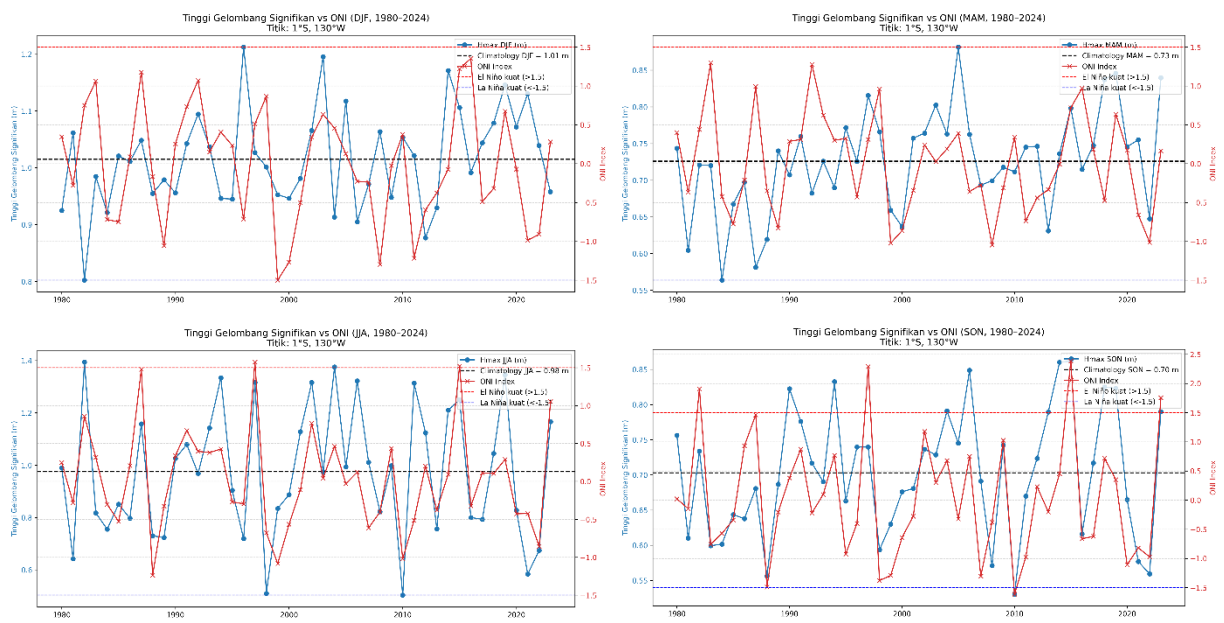
Gambar 5 merupakan anomali tinggi gelombang saat La Nina kuat. Pada musim DJF kondisi anomali tinggi gelombang bernilai negatif dengan nilai 0 hingga -0.1 m. Pada musim MAM dan JJA selama periode 1980 - 2023 tidak pernah terjadi La Nina kuat dengan nilai -1.5. Pada musim SON kondisi anomali tinggi gelombang bernilai negatif dibagian selatan dan barat dengan nilai 0 hingga -0.2 m sedangkan anomali positif dibagian barat laut dan utara dengan nilai 0 hingga +0.1 m.

Perbandingan Tinggi Gelombang dan ONI

Gambar 6 menunjukkan perbandingan tinggi Gelombang (1°S, 130°E) dengan ONI (1980 - 2023). Secara keseluruhan, terdapat keterkaitan negatif antara ONI dan tinggi gelombang signifikan di perairan Raja Ampat. Musim DJF adalah setiap penurunan ONI (fase La Niña) diikuti oleh peningkatan tinggi gelombang, sedangkan saat El Nino kuat, tinggi gelombang menurun. Pada musim MAM, tinggi gelombang relatif rendah (sekitar 0.5–1.5 m) dengan pola fluktuasi yang lebih halus. Pada musim MAM, La Niña cenderung menyebabkan sedikit peningkatan tinggi gelombang, namun efeknya lebih lemah dibanding DJF dan JJA. Pada musim JJA, merupakan puncak tinggi gelombang tahunan, berkisar antara 1.0 - 2.5 m, terutama pada periode La Nina kuat. Musim JJA adalah hubungan negatif paling kuat di antara keempat musim. Saat ONI turun (La Nina), tinggi gelombang naik secara signifikan, dan sebaliknya, ketika ONI naik (El Nino), gelombang menurun drastis. Pada Musim SON, efek ENSO masih terasa, namun tidak sekuat pada musim puncak (JJA).

Pengaruh ENSO Terhadap Tinggi Gelombang

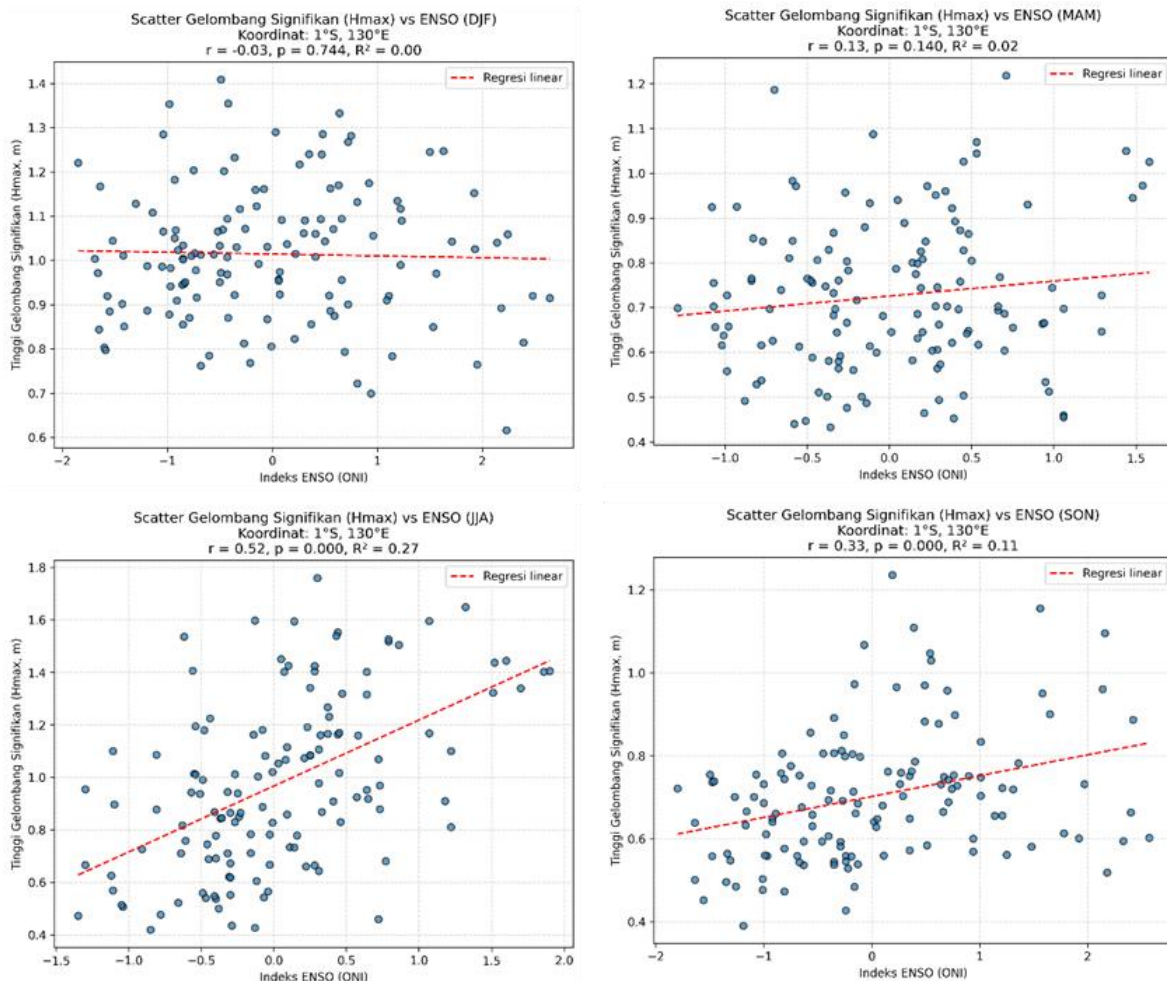
Korelasi antara indeks ONI terhadap Anomali data klimatologis musiman Tinggi Gelombang di perairan raja ampat tahun 1980-2023 dengan tampilan scatter plot disajikan pada gambar 7. Selama musim DJF, tidak ditemukan hubungan signifikan antara ENSO dan tinggi gelombang. Variasi tinggi gelombang di musim ini lebih dipengaruhi oleh faktor lokal atmosferik. Meskipun DJF merupakan periode puncak curah hujan akibat monsun barat, ENSO tidak memiliki kontrol langsung terhadap dinamika gelombang di Raja Ampat pada musim ini. Energi gelombang lebih ditentukan oleh faktor lokal dan kondisi angin baratan regional. Pada musim MAM menunjukkan korelasi positif lemah antara ENSO dan tinggi gelombang, namun tidak signifikan secara statistik. Anomali ENSO belum memberikan respon kuat terhadap dinamika laut di Raja Ampat selama periode peralihan monsun ini.



Gambar 6. Perbandingan Tinggi Gelombang (1°S, 130°E) dengan ONI (1980-2023).

Musim JJA menunjukkan korelasi positif kuat dan signifikan secara statistik antara ENSO dan tinggi gelombang. Musim JJA adalah periode paling sensitif terhadap ENSO, di mana variabilitas ONI menjelaskan hingga >25% variabilitas tinggi gelombang, Dimana menandakan bahwa pola monsun timur sangat terkait dengan dinamika ENSO di wilayah ini. Musim SON, hubungan tidak sekuat JJA, tetapi SON tetap menunjukkan pengaruh signifikan ENSO terhadap tinggi gelombang di Raja Ampat. ENSO memengaruhi tinggi gelombang melalui modulasi intensitas dan arah angin permukaan laut. Pada fase El Nino kuat, penguatan angin tenggara akibat peningkatan gradien tekanan atmosfer di wilayah Pasifik menyebabkan peningkatan energi gelombang dan menghasilkan tinggi gelombang yang signifikan, terutama pada musim timur. Sebaliknya, pada fase La Nina kuat, peningkatan konveksi dan kelembapan di kawasan Indonesia melemahkan angin baratan pada musim hujan, sehingga tinggi gelombang cenderung menurun. Dengan demikian, variasi tinggi gelombang di perairan Raja Ampat merupakan respon langsung terhadap perubahan siklus atmosfer laut global berbasis ENSO.

Pada fase El Niño kuat, penguatan angin tenggara yang dominan pada musim timur hingga peralihan kedua (JJA - SON) meningkatkan transfer energi dari atmosfer ke permukaan laut, sehingga menyebabkan kenaikan tinggi gelombang yang signifikan. Kondisi ini mencerminkan peran ENSO dalam memperkuat monsun timur dan memperbesar energi gelombang di perairan Raja Ampat. Sebaliknya, pada fase La Niña kuat, terjadi pelemahan angin baratan pada musim hujan hingga peralihan pertama (DJF - MAM) akibat meningkatnya konveksi dan kelembapan atmosfer, yang berdampak pada penurunan tinggi gelombang pada periode tersebut. Namun, pada musim timur (JJA), angin tenggara kembali menguat sehingga tinggi gelombang meningkat, meskipun dengan intensitas yang umumnya lebih rendah dibandingkan saat El Niño kuat.



Gambar 7. Korelasi Indeks ONI dengan Anomali Tinggi Gelombang (Musiman)

Pada musim DJF, nilai korelasi yang sangat lemah dan tidak signifikan ($r = -0.03$; $p > 0.05$) menunjukkan bahwa variasi tinggi gelombang tidak secara langsung dipengaruhi oleh ENSO, melainkan lebih didominasi oleh dinamika lokal seperti monsun barat dan proses konvektif. Pada musim MAM, hubungan antara ENSO dan tinggi gelombang bersifat positif namun masih lemah dan tidak signifikan ($r = 0.13$; $p > 0.05$), yang mengindikasikan bahwa pada musim peralihan pertama pengaruh ENSO terhadap gelombang belum berkembang secara optimal. Pada musim JJA terlihat hubungan positif yang kuat dan signifikan ($r = 0.52$; $p < 0.05$), yang menegaskan bahwa peningkatan intensitas ENSO (menuju El Nino) berkaitan erat dengan peningkatan tinggi gelombang. Hal ini mencerminkan peran dominan penguatan angin tenggara pada musim timur dalam mentransfer energi ke permukaan laut. Pada musim SON, hubungan positif sedang dan signifikan ($r = 0.33$; $p < 0.05$) menunjukkan adanya efek tertunda (lag effect) ENSO, di mana pengaruh El Nino atau La Nina yang berkembang pada JJA masih memengaruhi kondisi gelombang pada musim peralihan kedua.

Kondisi Klimatologis Angin Tahun 1980-2023

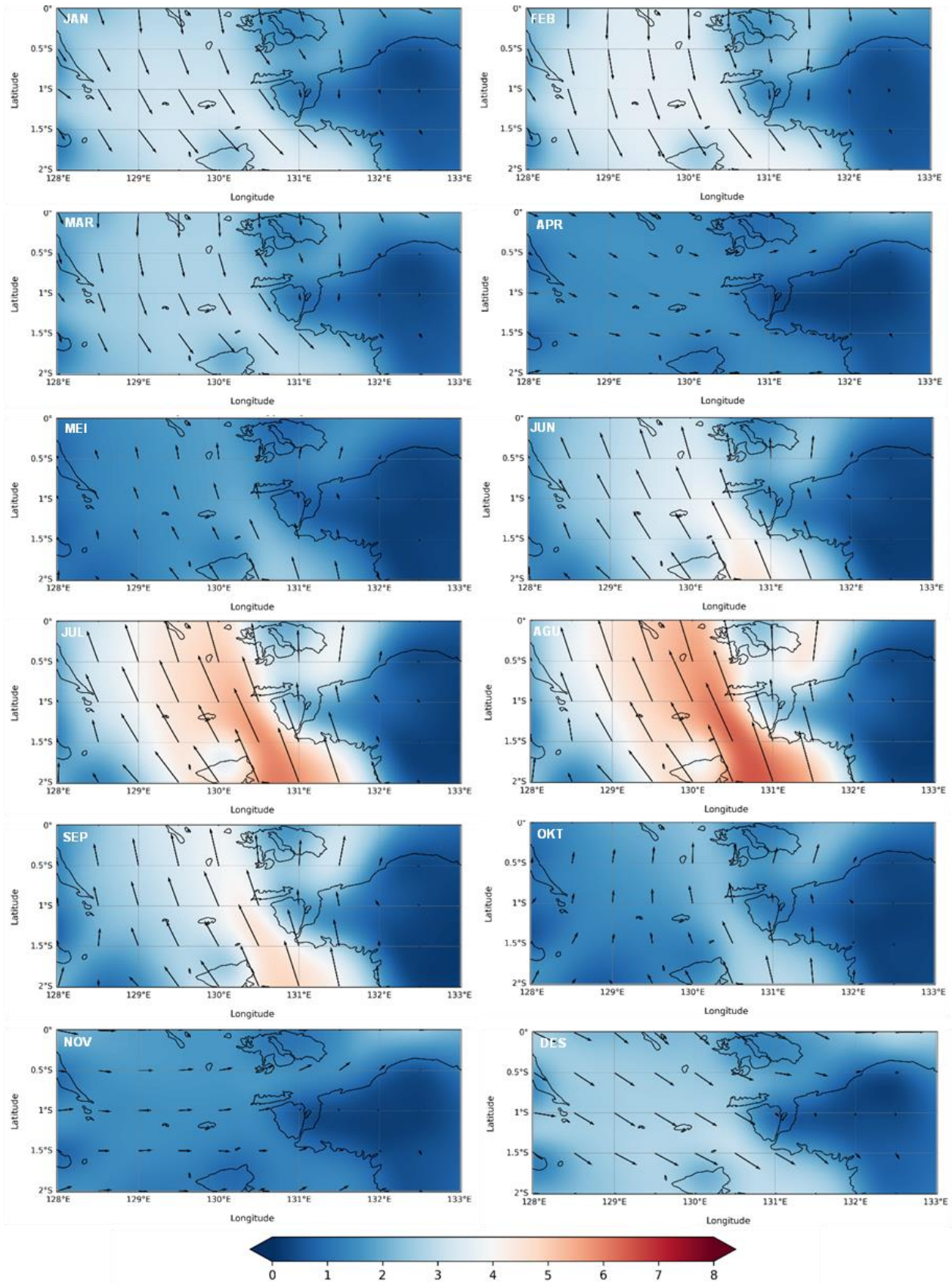
Rata-rata klimatologi angin tahun 1980-2023 di perairan Raja Ampat tersaji pada Gambar 8. Pada musim barat (DJF) angin dominan berasal dari barat laut ke Tenggara dengan kecepatan 4 - 6 m/s di sebagian besar wilayah barat Raja Ampat, lebih kuat di laut terbuka sebelah barat daya. Dampak klimatologisnya adalah meningkatkan tinggi gelombang di wilayah barat dan utara Raja Ampat. hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Permana *et al.*, (2016) selama periode monsoon barat (DJF) di wilayah Papua, angin dibentuk oleh monsoon barat laut yang berasal dari benua Asia dan dipengaruhi oleh pergeseran ITCZ. Hal ini juga sesuai dengan data pada metar-taf (2020 - 2024) yang mengatakan bahwa pada periode Desember - Februari arah utama angin yang mendominasi adalah dari arah barat atau barat daya. Pada kondisi ini terjadi musim hujan, dengan laut cenderung lebih bergelombang dan dapat mempengaruhi aktivitas pelayaran, pariwisata, dan perikanan. Pada saat peralihan ke musim timur (MMA) terjadi perubahan arah angin (lebih lemah dan tidak terarah) dengan kecepatan angin menurun yaitu 1 - 3 m/s. Dampak klimatologisnya adalah kondisi laut menjadi lebih tenang, tinggi gelombang menurun.

Pada saat musim timur (JJA) angin kuat dari Tenggara ke barat laut. Kecepatan angin tertinggi terjadi pada Juli - Agustus dengan nilai 6 - 9 m/s, hal ini sesuai dengan penelitian Ningsih *et al.*, (2023) yang mengatakan bahwa pada musim JJA kecepatan angin mencapai 7 - 10 m/s di perairan selatan Indonesia, termasuk Papua, dengan angin tetap dari tenggara. pada kondisi ini musim kemarau dengan laut yang cenderung bergelombang tinggi, umumnya tidak cocok untuk pelayaran kecil dan wisata Bahari, hal ini sesuai dengan penelitian Purwanto *et al.*, (2021) yang mengatakan gelombang tinggi berpotensi mengganggu pelayaran kecil, meningkatkan risiko keamanan, dan membatasi aktivitas wisata bahari. Pada saat peralihan ke musim barat (SON) arah angin kembali berubah tidak konsisten dengan kecepatan kembali melemah yaitu 2 - 4 m/s, hal ini sesuai dengan penelitian Ningsih *et al.*, (2023) yang mengatakan selama periode SON, kecepatan angin melemah menjadi sekitar 3 - 6 m/s, sekalipun arah angin kembali berubah (tidak konsisten). pada kondisi ini cuaca mulai berubah menuju musim hujan dengan aktivitas laut mulai membaik setelah musim angin timur.

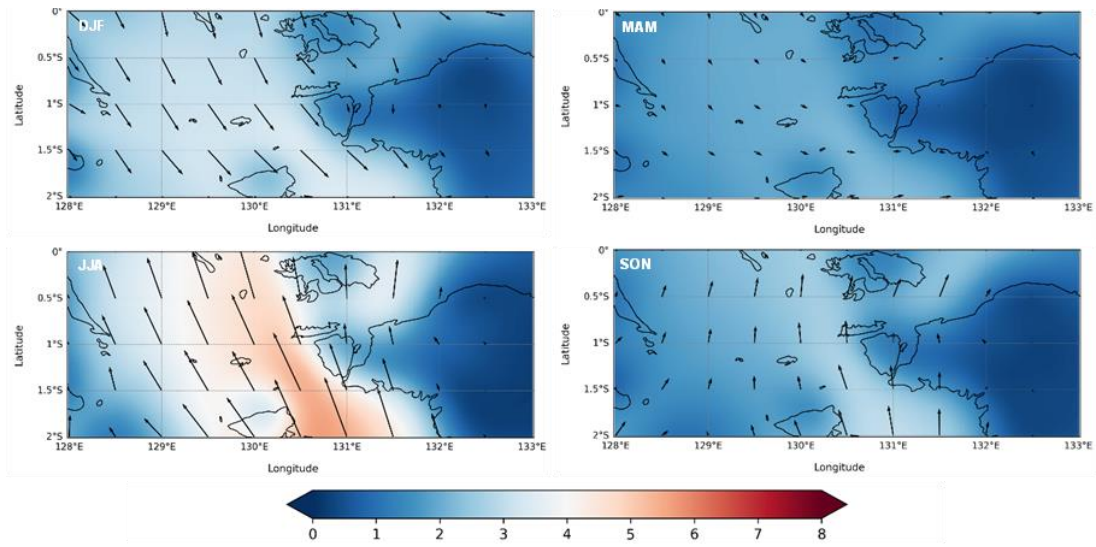
Variasi Musiman Angin Tahun 1980-2023

Gambar 9 menunjukkan variasi musiman angin tahun 1980 - 2023 (m/s). pada DJF angin dominan dari barat laut dengan kecepatan tinggi pada area terbuka sebesar 3 - 4 m/s. Variasi musiman angin pada MAM yaitu arah angin mulai bergeser ke arah timur dengan kecepatan angin rendah < 2 m/s. Angin yang relatif tenang kondisi laut cenderung stabil dan mendukung peningkatan tinggi gelombang dan kondisi baik untuk pelayaran antar pulau dan aktivitas selam. Hal ini sesuai dengan penelitian Wirasatriya *et al.*, (2017) yang mengatakan transisi MAM menghasilkan tinggi gelombang hangat dan produktivitas laut rendah.

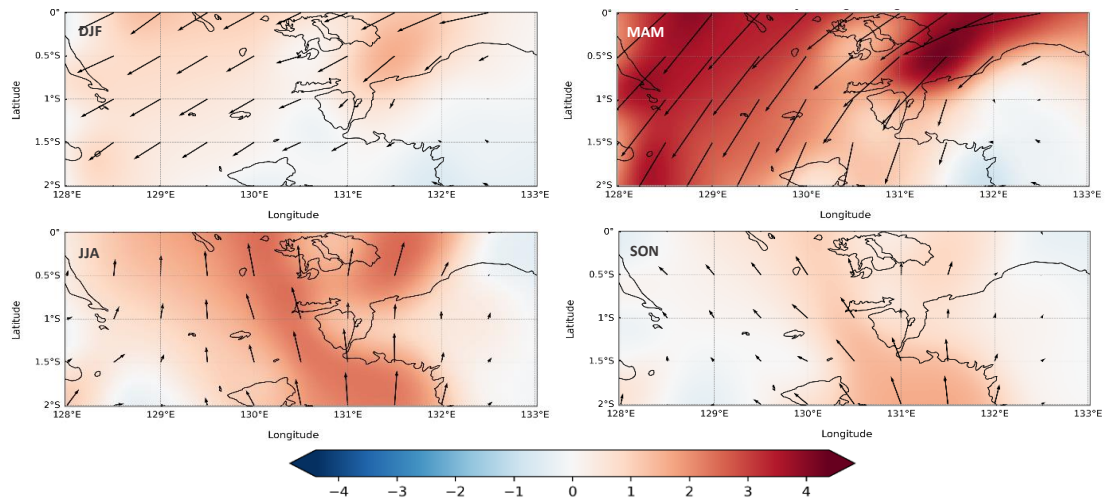
Variasi musiman angin pada JJA yaitu angin dominan dari tenggara dengan kecepatan tertinggi (puncak musiman) dengan kecepatan 6-9 m/s di wilayah perairan Raja Ampat. Musim angin timur yang dominan menyebabkan mixing vertikal meningkat yang mengakibatkan distribusi nutrisi naik sehingga produktivitas perikanan meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian Cahyo *et al.*, (2024), yaitu konsentrasi klorofil-a tertinggi terjadi di bulan Juni (musim timur), hal ini juga dijelaskan dalam beberapa paper terdahulu bahwa proses upwelling terjadi karena adanya angin yang bertiup secara kontinyu hampir sejajar garis pantai dari arah tenggara ke arah barat daya. Angin musim timur memicu pendinginan tinggi gelombang dan lonjakan produksi klorofil di Arafura dan sekitarnya (Iskandar *et al.*, (2009); Oktaviani *et al.*, (2021).



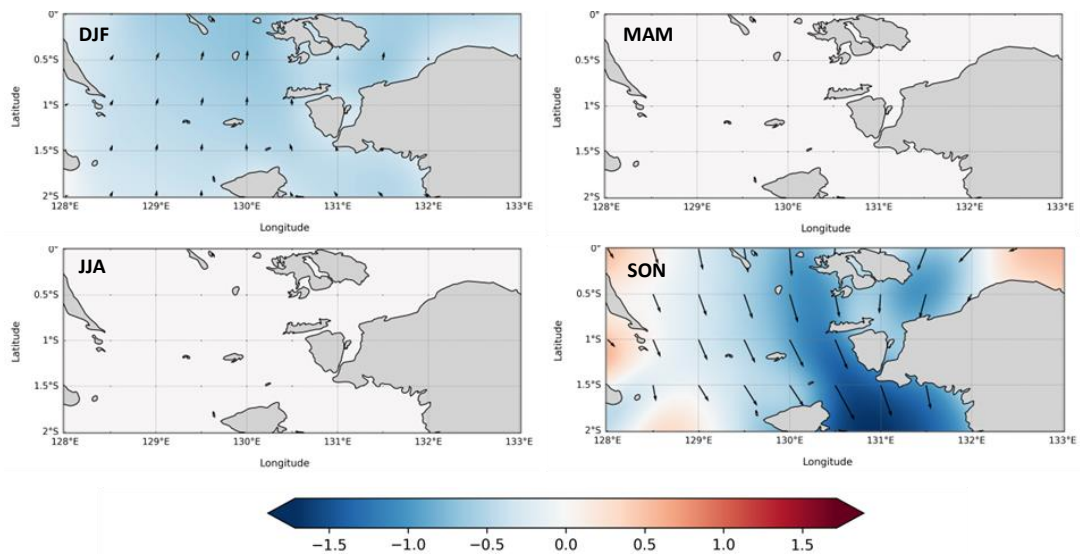
Gambar 8. Rata-Rata Klimatologi Angin Tahun 1980-2023



Gambar 9. Variasi Musiman Angin Tahun 1980 - 2023 (m/s).



Gambar 10. Anomali Angin Saat El Nino Kuat



Gambar 11. Anomali Angin Saat La Nina Kuat

Anomali Angin Saat El Nino Kuat

Gambar 10 menunjukkan anomali angin saat el nino kuat. Pada musim DJF, anomali positif moderat (1 - 2 m/s) yang meluas di seluruh wilayah Raja Ampat, dengan arah angin dominan dari barat laut ke tenggara. Anomali positif ini memperkuat Monsun Barat, namun dengan kelembapan rendah akibat penurunan uap air di lapisan troposfer bawah. Dampaknya terhadap gelombang tidak terlalu signifikan karena dominasi arah angin baratan di musim ini lebih bersifat transien. Musim MAM menunjukkan anomali angin paling kuat (hingga +4 m/s) di seluruh perairan Raja Ampat, terutama bagian barat laut dan tengah, dengan arah angin condong dari barat laut ke tenggara. Anomali positif kuat pada MAM menunjukkan transisi paling aktif akibat ENSO, menjadikan MAM periode puncak perubahan atmosfer. Energi kinetik angin meningkat, berpotensi meningkatkan pembangkitan gelombang di perairan terbuka bagian barat Raja Ampat. Pada musim JJA, anomali positif juga signifikan (+2 hingga +3 m/s), dengan arah angin dominan dari tenggara ke barat laut. Energi angin yang meningkat di JJA secara langsung memperbesar tinggi gelombang signifikan. Hal ini menjelaskan bahwa JJA merupakan musim dengan pengaruh ENSO paling kuat terhadap dinamika laut Raja Ampat, melalui mekanisme penguatan monsun timur. Pada musim SON, anomali positif lemah hingga sedang (sekitar +1 hingga +2 m/s) dengan arah angin cenderung tenggara–barat laut di bagian selatan, dan timur–barat di bagian utara. Pengaruh El Niño terhadap angin mulai berkurang, tetapi masih cukup untuk mempertahankan tinggi gelombang di atas normal, terutama di perairan selatan Raja Ampat. Mahinsha *et al.*, (2023), menyatakan bahwa tinggi dan kedalaman gelombang pecah berbeda-beda pada setiap musim yang disebabkan oleh tekanan angin yang berbeda pula pada setiap bulannya yang mempengaruhi penjalaran gelombang.

Anomali Angin Saat La Nina Kuat

Gambar 11 menunjukkan anomali angin saat El Nino kuat. Kondisi angin pada musim DJF didominasi anomali negatif sebesar -0.5 hingga -1.5 m/s dengan arah angin tidak beraturan. Anomali saat DJF menunjukkan ketika terjadi La Nina kuat pada musim DJF di Perairan Raja Ampat cenderung mengurangi kecepatan angin dari normalnya sebesar 0.5 hingga 1.5 m/s. Pada SON menunjukkan anomali negatif luas (sekitar -1 hingga -2 m/s) di wilayah Raja Ampat, dengan arah angin dominan dari barat laut. Anomali saat musim SON menunjukkan ketika terjadi La Nina kuat di Perairan Raja Ampat cenderung mengurangi kecepatan angin dari normalnya sebesar 1 hingga 2 m/s.

KESIMPULAN

Pola angin musiman mempengaruhi variasi tinggi gelombang di perairan Raja Ampat. Pada musim DJF baik El Nino Kuat maupun La Nina Kuat menyebabkan penurunan tinggi gelombang, sehingga laut lebih tenang dibanding kondisi normal. Pada musim MAM, El Nino Kuat meningkatkan tinggi gelombang akibat penguatan angin barat - laut, sedangkan La Nina Kuat menurunkan tinggi gelombang karena melemahnya angin. Pada JJA, baik El Niño Kuat maupun La Nina Kuat meningkatkan tinggi gelombang, dengan pengaruh El Nino lebih kuat dibanding La Nina. Sementara pada musim SON, El Nino Kuat mempertahankan gelombang tetap tinggi, sedangkan La Nina Kuat menurunkan energi angin sehingga tinggi gelombang melemah menjelang musim hujan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilo, E., Joaquin, A., Maria, S. 2005. The Persistence of the Sun And Sand Tourism Model. *Tourism Management*. 26(2), 219-231. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2003.11.004>.
- Arguez, A., Imke D., Scott, A., Rusell, S., V., Michael, F., S., Xungang, Y., Richard, R., H., & Timothy. W., O. 2012. NOAA's 1981–2010 U.S. Climate Normals: An Overview. *American Meteorological Society*. 93(11): 1687-1697. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00197.1>
- BMKG. 2025. Informasi ENSO. <https://iklim.bmkg.go.id/id/enso/> (diakses pada 4 September 2025)
- Cahyo, D.M.N. Indrayanti, E., & Maslukah, L. 2024. Pola Distribusi Klorofil-a di Perairan Pekalongan sampai Kendal Berdasarkan Data Sentinel. *Indonesian Journal of Oceanography* 6(1): 01-08.
- Oktaviani, D., Handoyo, G., Helmi, M., Kunarso & Wirasatriya, A. 2021. Karakteristik Upwelling pada Periode Indian Ocean Dipole (IOD) Positif di Perairan Selatan Jawa Barat. *Indonesian Journal of Oceanography* 3(4): 23-30.
- Fadlan, A., Aror, R. D., & Sugianto, D. N., 2017. Monthly Variation Characteristics of Wave Height in North Sulawesi. *Waste Technology* 5(1), 21–26. <https://doi.org/10.14710/5.1.21-26>.

- Fathurohman, A., Napitupulu, G., Fujiawati, G., & Napitupulu, M. 2025. Impact of Significant Wave Height, Wind Speed, and Precipitation Variability on Shipping Safety in Indonesian Archipelagic Sea Lanes. *Bulletin of the Marine Geology*, 40(1). <https://doi.org/10.32693/bomg.40.1.2025.895>
- Habibie, M., N., Fitria, W., & Ibnu., S. (2018). Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang signifikan di Indonesia. *J. Segara*. 14 (3): 159-168.
- Handoko, E. Y. & Filaili, R. B., 2019. Analisa Fenomena Enso Di Perairan Indonesia Menggunakan Data Altimetri Topex/Poseidon dan Jason. *Geoid*, 14(2): 43-50.
- Huwa, M. A., Fikri, M., H., & Klasina, R. (2018). Redefining Tourism Governance in Raja Ampat: Sustainable tourism development. *Jurnal Perencanaan Pembangunan–Media Riset dan Aplikasi*, 2(3). <https://doi.org/10.36574/jpp.v2i3.40>.
- Jhuswanto, F. R., & Nurul, F. (2023). Circular Economy for The Raja Ampat Ecotourism Development. *Journal of World Tourism Studies*, 8(1). <https://doi.org/10.22146/jwts.v8i1.10940>
- Kurniawan, F., Adrianto, L., Bengen, D. G., & Prasetyo, L. (2016). Vulnerability Assessment of Small Islands to Tourism: The Case of the Marine Tourism Park of the Gili Matra Islands, Indonesia. *Global Ecology and Conservation*, 6, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.04.001>.
- Kurniawan, R. Habibie, M. N. & Suratno, S., 2011. Variasi Bulanan Gelombang Laut di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12(3), 221–232. <https://doi.org/10.31172/jmg.v12i3.104>
- Kurniawan, K. & Khotimah, M.K., 2016. Ocean Wave Characteristics in Indonesian Waters for Sea Transportation Safety and Planning. *The Journal for Technology and Science*, 26(1):19-27
- Larasati, S., E., & Aminun, F., A. (2023). Analisis Ekowisata di Kawasan Konservasi Perairan Raja Ampat: Daya Dukung dan Evaluasi Wisatawan dari Situs TripAdvisor. *Jurnal Nasional Pariwisata*. 13(2): 115-134.
- Mahinsha, A., N., I., Muhammad, H. & Aris, I., 2023. Analisis Dampak Rencana Perluasan Reklamasi Akibat Perubahan Karakteristik Arus Dan Gelombang Di Perairan Kota Semarang, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography* 5(3), 165-175.
- Nazir, M., 2003. Metode Penelitian. PT Ghalia Indonesia, Jakarta.
- Ningsih, N. S. Ainun, & Titan. M. A., 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 (2023), Art. no. 106738. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106738
- Pearson, K., 1895. Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242.
- Permana, H., Sopaheluwakan, J. & Wahyudi, A., 2016. Musim dan Dinamika Laut di Wilayah Timur Indonesia. LIPI Press.
- Philander S.G. H., 1992. El Nino, La Nina, and Southern Oscillation. Academic Press Inc., San diego, California, USA.
- 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>.
- Sukresno, B., Denarika, J., & Denny, W., K. 2018. Multilayer Analysis of Upwelling Variability In South Java Sea. *Jurnal Kelautan Nasional*, 13(1), 15–25. <http://dx.doi.org/10.15578/jkn.v1i1.6619>.
- Suwarto, T. 2011. Pengaruh Iklim Dan Perubahannya Terhadap Destinasi Pariwisata Pantai Pangandaran. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota* 22(1), 17-32.
- Wirasatriya, A., Riza, Y., S., & Petrus, S. 2017. The Effect of ENSO on the Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 10(12): 5513–5518.
- Wyrtki, K., 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. University of California, (Vol. 2). Scripps Institution of Oceanography.
- Zikra, M., & Putika, A. 2015. Wave Climate Variations in Indonesia Based on ERA-Interim Reanalysis Data from 1980 to 2014. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace Science and Engineering*. 24(3), 14-17. <http://dx.doi.org/10.36842/jomase.v24i1.437>.