

## Studi Karakteristik Gelombang Laut Perairan Indonesia Menggunakan Model *Simulating Wave Nearshore* (SWAN)

Salvina Herawaty Puna, Ibadur Rahman, Sholihati Lathifa Sakina\*

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram  
Jl. Majapahit No. 62, Mataram, Nusa Tenggara Barat, 83116, Indonesia  
Email: \*sholihati.lathifasakina@staff.unram.ac.id

### Abstrak

Gelombang laut merupakan elemen penting dalam oseanografi yang memengaruhi berbagai aktivitas di wilayah pesisir, seperti transportasi laut, pembangunan infrastruktur, hingga perikanan. Namun, ketersediaan data gelombang di Indonesia masih sangat terbatas dan umumnya hanya mencakup wilayah tertentu atau data lampau. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pemodelan seperti *hindcasting* gelombang agar informasi gelombang laut di Indonesia bisa diperoleh secara lebih luas dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik gelombang laut di perairan Indonesia dengan menggunakan model numerik *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) melalui pendekatan nested model. Pemodelan dilakukan pada dua skala domain, yakni regional dan nested, dengan resolusi spasial masing-masing  $0,25^\circ$  dan  $0,1^\circ$ , serta periode simulasi dari tahun 2020 hingga 2023. Data input meliputi kecepatan angin dari ECMWF dan data batimetri dari GEBCO, yang kemudian divalidasi menggunakan data *buoy* di wilayah Australia. Hasil validasi menunjukkan bahwa model SWAN mampu menggambarkan tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) dengan baik, dengan nilai korelasi 0,699–0,921 dan RMSE yang relatif rendah. Analisis spasial dan musiman menunjukkan bahwa gelombang tertinggi terjadi pada musim timur (Juni–Agustus), terutama di wilayah selatan Indonesia, sedangkan gelombang terendah terjadi pada musim peralihan I (Maret–Mei). Hasil juga menunjukkan bahwa fenomena iklim global ENSO berpengaruh signifikan terhadap anomali  $H_s$  di wilayah utara Indonesia selama fase El Niño. Sementara itu, korelasi antara IODM dan anomali  $H_s$  menunjukkan pola negatif di wilayah selatan dan positif di wilayah utara.

**Kata kunci :** ENSO; IODM; SWAN; tinggi gelombang signifikan

### Abstract

#### *Study of Ocean Wave Characteristics in Indonesian Waters Using the Simulating Waves Nearshore (SWAN) Model*

Ocean waves are a crucial element in oceanography, influencing various coastal activities such as maritime transportation, infrastructure development, and fisheries. However, the availability of wave data in Indonesia remains very limited and typically only covers certain areas or historical periods. Therefore, modeling approaches such as wave hindcasting are needed to obtain more comprehensive and accurate wave information across Indonesian waters. This study aims to analyze the characteristics of ocean waves in Indonesian waters using the numerical model *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) through a nested model approach. The modeling was conducted at two domain scales—regional and nested—with spatial resolutions of  $0.25^\circ$  and  $0.1^\circ$ , respectively, and a simulation period from 2020 to 2023. Input data included wind speed from ECMWF and bathymetry from GEBCO, which were validated using buoy data from Australian waters. The validation results show that the SWAN model is capable of representing significant wave height ( $H_s$ ) well, with correlation values ranging from 0.699 to 0.921 and relatively low RMSE. Spatial and seasonal analyses reveal that the highest waves occur during the southeast monsoon (June–August), particularly in southern Indonesia, while the lowest waves are observed during the first transitional season (March–May). The results also indicate that the global climate phenomenon ENSO significantly affects  $H_s$  anomalies in northern Indonesian waters during El Niño phases. Meanwhile, the correlation between IODM and  $H_s$  anomalies shows a negative pattern in the south and a positive pattern in the north.

**Keywords :** ENSO; IODM; SWAN; significant wave height

## PENDAHULUAN

Gelombang laut merupakan salah satu elemen penting dalam oseanografi yang mempengaruhi berbagai aktivitas manusia, khususnya di wilayah pesisir. Gelombang terbentuk sebagai hasil dari gangguan pada permukaan laut yang umumnya disebabkan oleh angin yang bertiup melintasi permukaan air (Safda *et al.*, 2024). Menurut Milansi (2023), gelombang laut merupakan fenomena fisik akibat gangguan mekanis yang menyebar melalui permukaan air membentuk pola tertentu. Faktor yang menyebabkan pembentukan gelombang, meliputi angin, gempa tektonik atau vulkanik, serta kedalaman perairan (Prarikeslan, 2016).

Letak geografis Indonesia yang berada di antara dua benua, yaitu Asia dan Australia, menyebabkan pembentukan gelombang di wilayah ini dipengaruhi oleh sistem angin musiman atau monsun (Habibie & Fitria, 2019). Selain pola angin musiman, fenomena iklim global seperti *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM) turut berperan dalam mempengaruhi tinggi serta karakteristik gelombang di perairan Indonesia (Ramadhan *et al.*, 2021; Claudya *et al.*, 2023). Variabilitas iklim dan dinamika angin ini menghasilkan karakteristik gelombang yang cukup kompleks di perairan nusantara.

Gelombang laut berperan penting dalam berbagai aspek kehidupan dan pembangunan wilayah pesisir. Menurut Kunarso *et al.* (2018), gelombang laut mempengaruhi berbagai aktivitas manusia, seperti proyek lepas pantai, transportasi laut, serta kegiatan pariwisata. Selain itu, aktivitas penangkapan ikan dan pembangunan infrastruktur pantai juga sangat dipengaruhi oleh kondisi gelombang laut (Sebayang & Kurniadi, 2015). Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik gelombang laut di suatu wilayah perairan menjadi sangat penting. Hal ini semakin krusial di negara kepulauan seperti Indonesia, yang memiliki luas perairan mencapai 6,4 juta km<sup>2</sup>, di mana sebagian besar kehidupan dan aktivitas ekonomi masyarakat bergantung pada laut.

Meskipun peran gelombang sangat penting, ketersediaan data gelombang di Indonesia saat ini masih sangat terbatas. Beberapa penelitian telah menjelaskan karakteristik gelombang di perairan Indonesia, misalnya penelitian yang dilakukan oleh Adriat *et al.* (2024) mengenai karakteristik gelombang di Pantai Samudra Indah, Kalimantan Barat, dan studi yang dilakukan oleh Ribal *et al.* (2020) mengenai karakteristik dan potensi energi gelombang di perairan Indonesia. Namun, penelitian-penelitian tersebut cenderung menggunakan data lampau atau terbatas pada wilayah tertentu, sehingga belum ada data gelombang terbaru di perairan Indonesia. Padahal, data gelombang diperlukan dalam perencanaan infrastruktur pesisir dan pengelolaan sumber daya laut. Keputusan berbasis data yang tidak lengkap dapat mengarah pada resiko tinggi terhadap proyek-proyek pembangunan di daerah pesisir (Lail *et al.*, 2018).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah metode *hindcasting*, yaitu pemodelan ulang kondisi gelombang berdasarkan data angin masa lalu (Hamid *et al.*, 2023). *Hindcasting* dengan menggunakan model numerik seperti SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) memungkinkan peramalan tinggi dan arah gelombang pada berbagai skala ruang dan waktu. Penggunaan model numerik dapat sangat membantu untuk mengetahui informasi gelombang laut di Indonesia, mengingat masih minimnya stasiun pengamatan gelombang dan lembaga kredibel yang mendokumentasikan dan menghasilkan data gelombang di Indonesia secara berkala. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik gelombang laut di perairan Indonesia dengan menggunakan model SWAN, serta menganalisis keterkaitannya dengan fenomena ENSO dan IODM.

## MATERI DAN METODE

### Deskripsi Model SWAN

Penelitian ini menggunakan model SWAN yang merupakan model gelombang generasi ketiga. Model SWAN menghitung pertumbuhan gelombang akibat angin, pelemahan gelombang oleh *whitecapping*, serta empat jenis interaksi nonlinier antar gelombang (quadruplets). Model ini juga memperhitungkan proses fisik lain. Persamaan dasar SWAN, sama seperti model gelombang generasi ketiga lainnya, yakni menggunakan persamaan keseimbangan aksi berikut (Komen *et al.*, 1994 dalam The SWAN Team, 2013).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{\lambda} N}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_{\varphi} N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

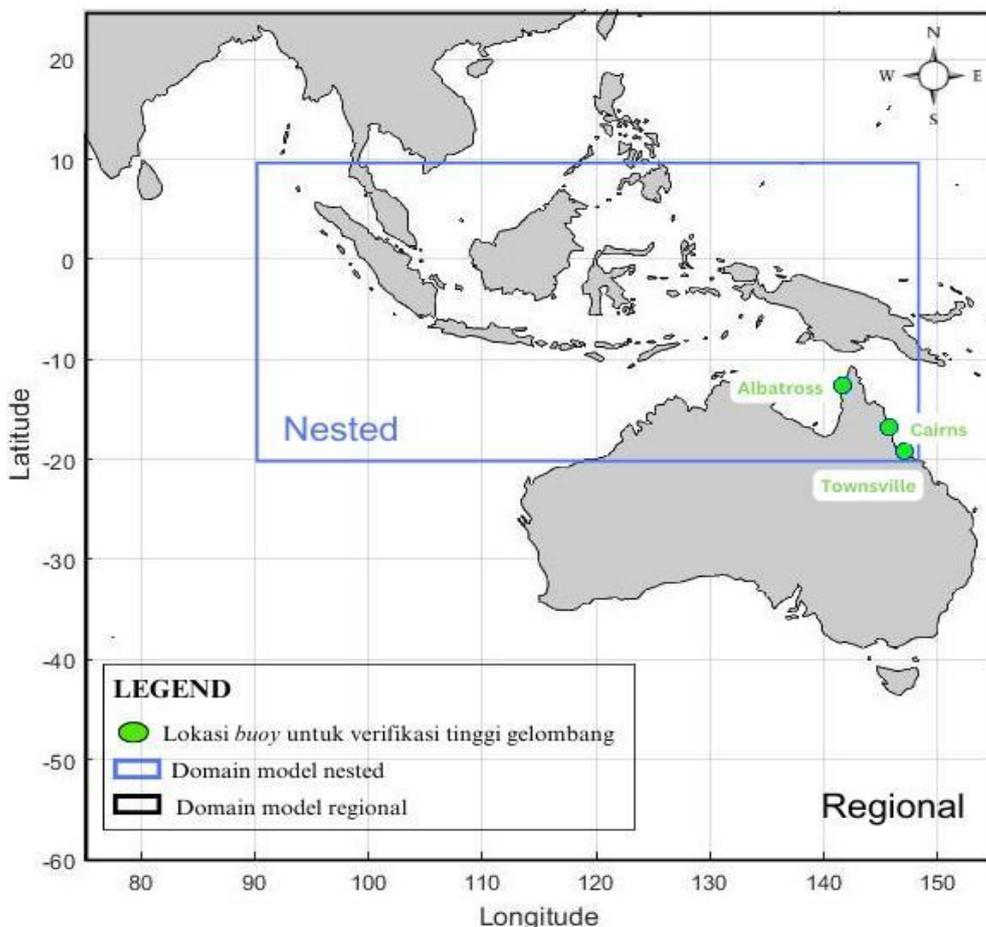
Simbol  $N$  merujuk pada densitas aksi yang dipetakan berdasarkan koordinat geografis, yaitu bujur ( $\lambda$ ) dan lintang ( $\varphi$ ). Komponen  $c_{\lambda}$  menunjukkan kecepatan rambat densitas aksi pada arah bujur, sedangkan  $c_{\varphi}$

menunjukkan kecepatannya pada arah lintang. Di sisi lain, perubahan spektrum gelombang juga diperhitungkan melalui komponen spektral, yaitu  $c\sigma$  untuk kecepatan rambat terhadap frekuensi dan  $c\theta$  untuk kecepatan rambat terhadap arah datang gelombang. Sementara itu, simbol  $S$  menggambarkan proses fisik non-konservatif, seperti masukan dan kehilangan energi, yang bisa menyebabkan energi gelombang hilang, bertambah, atau tersebar ulang di satu titik tertentu, proses tersebut dikenal sebagai source and sink.

**Desain Model**

Wilayah kajian dalam penelitian ini yaitu di Perairan Indonesia ( $90^{\circ}E - 147,5^{\circ}E, 10^{\circ}N - 20^{\circ}S$ ). Data yang dianalisis meliputi rentang waktu 4 tahun, yaitu dari tahun 2020 hingga 2023. Indonesia, seperti yang terlihat pada Gambar 1, berada di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Letaknya yang berada di daerah tropis dengan kondisi angin yang tidak terlalu kuat sepanjang tahun, maka hanya sedikit gelombang yang dihasilkan akibat angin lokal (Ribal *et al.*, 2020). Namun, gelombang yang berasal dari Samudra Hindia dapat merambat dan mencapai perairan Indonesia sebagai gelombang *swell* (Fan *et al.*, 2014). Menurut Sprintall *et al.* (2000), salah satu hal yang mempengaruhi tinggi gelombang di perairan Indonesia adalah angin yang berasal dari lintang tinggi. Maka dari itu, peramalan gelombang dalam penelitian ini menggunakan model yang telah di-*nested*. Desain model regional dan model *nested* tersaji dalam Tabel 1.

Input model gelombang dalam penelitian ini terdiri dari data angin komponen  $u$  dan  $v$ , serta data batimetri. Data angin diunduh dari situs ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) yang memiliki resolusi  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  dengan interval waktu 1 jam. Data batimetri yang digunakan untuk model regional diperoleh dari situs GEBCO (<https://download.gebco.net/>) yang memiliki resolusi grid 15 *arc-second* (0.4638 km). Simulasi model gelombang dilakukan dengan menggunakan *software* (SWAN). Kemudian, hasil simulasi model regional di validasi dengan data pengamatan *buoy*.



**Gambar 1.** Peta lokasi kajian model regional dan nested

**Validasi Model**

Data yang digunakan untuk validasi model gelombang hasil keluaran SWAN adalah data tinggi gelombang signifikan hasil pengamatan dari *buoy* (pelampung) yang berada di perairan Australia. Data *buoy* tersebut diperoleh dari situs AODN (<https://portal.aodn.org.au/>). Data *buoy* yang digunakan untuk validasi adalah data tinggi gelombang signifikan pada tanggal 15 Juni 2018 hingga 28 Juni 2018 (dua pekan). Terdapat tiga lokasi yang dipilih untuk validasi model, yaitu pelampung yang terletak di Albatross, Cairns, dan Townsville (Gambar 1). Pemilihan ketiga lokasi ini didasarkan pada kedekatannya dengan perairan Indonesia. Detail informasi mengenai ketiga *buoy* tersebut tersaji dalam Tabel 2.

Validasi data difokuskan pada tinggi gelombang signifikan. Untuk menilai kemampuan model, terdapat tiga parameter yang dipilih untuk dilakukan validasi, yaitu bias (*B*), *root mean square error* (*RMSE*), dan koefisien korelasi Pearson (*R*) (Zieger *et al.*, 2016 dalam Ribal *et al.*, 2020). Perhitungan untuk validasi data tersaji pada persamaan (1) – (3) berikut :

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i) \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2} \tag{2}$$

$$R = \frac{cov(O,M)}{\sqrt{cov(O)cov(M)}} \tag{3}$$

Bias, *Root Mean Square Error* (*RMSE*), dan koefisien korelasi Pearson (*R*) digunakan sebagai parameter statistik untuk mengevaluasi performa model. Dalam hal ini, *B* merupakan nilai bias, *RMSE* adalah akar dari rata-rata kuadrat galat, dan *R* menunjukkan kekuatan hubungan linier antara data hasil observasi dan hasil model. Simbol *O* merepresentasikan data tinggi gelombang signifikan (*Hs*) dari *buoy* observasi, sedangkan *M* merupakan data *Hs* keluaran dari model SWAN. Jumlah total data yang digunakan dalam evaluasi ditandai dengan *N*, sementara *Cov(O)* dan *Cov(M)* masing-masing adalah kovarian dari data observasi dan hasil model.

**Tabel 1.** Desain model penelitian

Setting	Model Regional	Model Nested
Domain	25°N – 60°S, 75°E – 155°E	90°E – 147,5°E, 10°N – 20°S
Resolusi	0,25°×0,25°	0,1°×0,1°
Ukuran Grid	108.800 grid	172.500 grid
Waktu	Desember 2019 – Desember 2023	16 Desember 2019 – 31 Desember 2023
<i>Spin up time</i>	1 Bulan	2 Minggu
<i>Time step</i>	1 Jam	30 Menit
Frekuensi	0,04 - 1 Hz	0,04 - 1 Hz

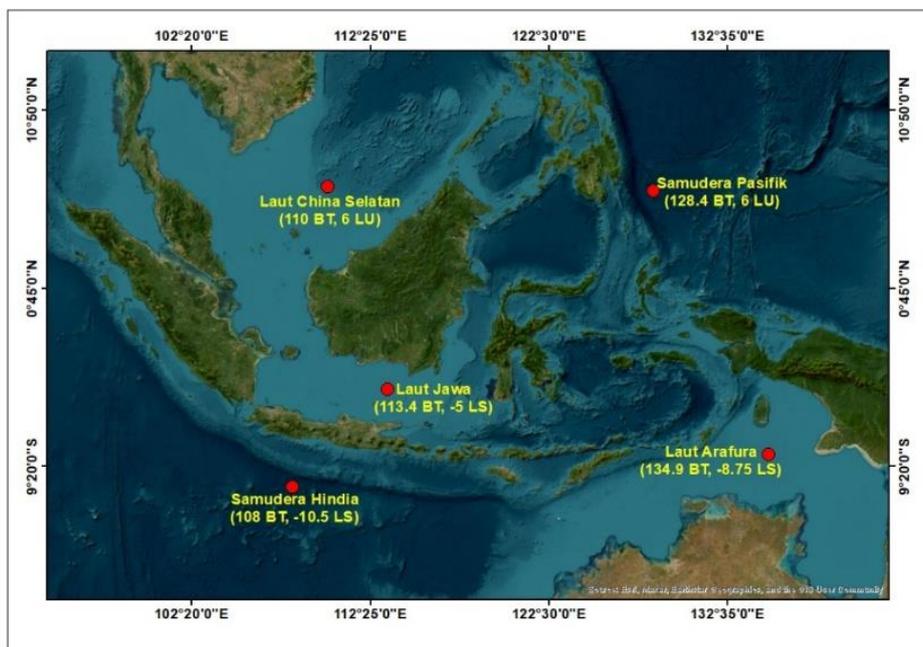
**Tabel 2.** Lokasi *buoy* yang digunakan untuk validasi model. (Sumber: AODN)

Lokasi <i>Buoy</i>	Lintang	Bujur	Kedalaman <i>Buoy</i>
Albatross, Queensland	12,688° S	141,684° E	10 m
Cairns, Queensland	16,731° S	145,715° E	12 m
Townsville, Queensland	19,159° S	147,059° E	17 m

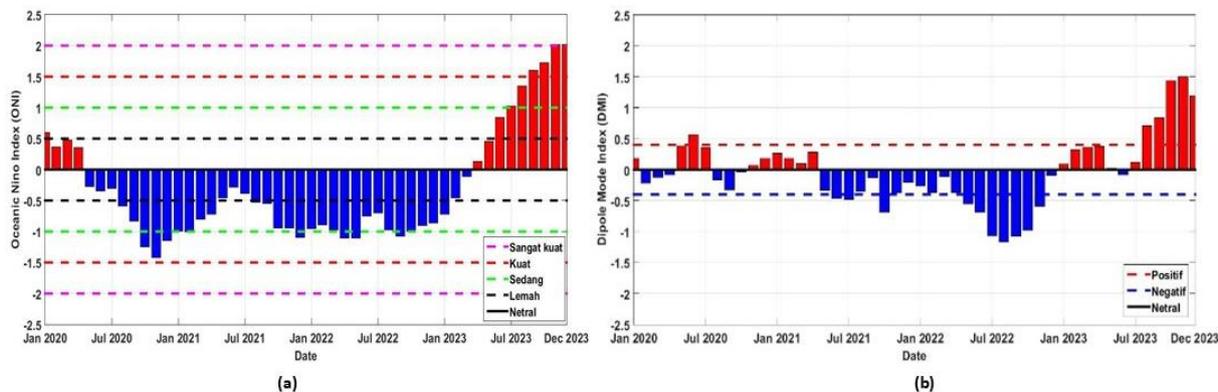
**Analisis Data**

Hasil simulasi model SWAN berupa tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ), arah gelombang, serta kecepatan dan arah angin dengan resolusi temporal 1 jam selama periode 2020–2023. Data ini kemudian dirata-ratakan berdasarkan musim, yaitu DJF (musim barat), MAM (peralihan I), JJA (musim timur), dan SON (peralihan II), lalu divisualisasikan dalam bentuk peta musiman tinggi gelombang dan kecepatan angin. Untuk menghitung rata-rata musiman dari data simulasi model SWAN, data tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ), arah gelombang, kecepatan angin, dan arah angin dikelompokkan berdasarkan periode musiman, yakni DJF (Desember–Februari), MAM (Maret–Mei), JJA (Juni–Agustus), dan SON (September–November) selama periode 2020–2023. Kemudian, nilai data musiman per jam dari masing-masing parameter dijumlahkan dan dibagi dengan jumlah total jam dalam periode musiman tersebut.

Analisis lebih lanjut dilakukan pada lima lokasi, yakni Laut Cina Selatan, Samudra Pasifik, Laut Arafura, Samudra Hindia, dan Laut Jawa. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada Hardjono (2018) dalam Purwanto *et al.* (2021), yang menyebutkan bahwa area tersebut meliputi Laut China Selatan dan Samudra Pasifik yang mewakili wilayah ekuator utara, Laut Arafura dan Samudra Hindia yang mewakili wilayah ekuator selatan; serta Laut Jawa yang mewakili laut di bagian dalam (Gambar 2).



**Gambar 2.** Lokasi pemilihan titik untuk analisis tinggi gelombang



**Gambar 3.** Oceanic Nino Index (a) dan Dipole Mode Index (b) tahun 2020-2023 (Sumber: NOAA)

Analisis tinggi gelombang pada lima lokasi tersebut dilakukan dengan menghitung beberapa parameter, yaitu rata-rata tinggi gelombang maksimum ( $H_s$  Max), rata-rata tinggi gelombang ( $H_s$ ), dan frekuensi tinggi gelombang lebih dari 2 meter (Frekuensi) pada periode 2020 hingga 2023. Perhitungan  $H_s$  Max dilakukan berdasarkan Kashima *et al.* (2014) yang ditampilkan pada persamaan (4) berikut.

$$H_s \text{ Max} = 1.86 \times H_s \quad (4)$$

Selain itu, penelitian ini juga menganalisis hubungan antara anomali tinggi gelombang bulanan dengan fenomena iklim global ENSO dan IODM. Nilai anomali diperoleh dari selisih antara rata-rata tinggi gelombang bulanan selama periode 2020–2023 dengan nilai tinggi gelombang bulanan hasil keluaran model SWAN. Gambar 3 menampilkan Indeks ENSO (*Oceanic Niño Index/ONI*) dan IODM (*Dipole Mode Index/DMI*) diunduh melalui situs NOAA (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Selanjutnya, hubungan antara anomali tinggi gelombang dan indeks iklim dihitung menggunakan rumus berdasarkan Kurniawan *et al.* (2012) berikut untuk mengetahui hubungan ENSO dan IODM terhadap variabilitas tinggi gelombang di wilayah studi.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

Koefisien korelasi ( $r$ ) antara indeks bulanan ENSO atau IODM ( $x$ ) dan anomali rata-rata bulanan tinggi gelombang signifikan ( $y$ ) dihitung untuk menganalisis hubungan antara fenomena iklim dan variabilitas gelombang. Nilai ( $r$ ) menunjukkan kekuatan dan arah hubungan linier antara kedua variabel, di mana ( $x$ ) merepresentasikan nilai indeks bulanan ENSO/IODM dan ( $y$ ) merepresentasikan anomali tinggi gelombang signifikan pada periode yang sama.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Validasi Model

Hasil validasi menunjukkan nilai korelasi antara  $H_s$  model SWAN dan data *buoy* berkisar antara  $R=0,699-0,921$ , yang termasuk dalam kategori cukup kuat hingga sangat kuat. Nilai korelasi tertinggi berlokasi di Townsville ( $R = 0,921$ ) yang menunjukkan bahwa hasil model mendekati keadaan yang sebenarnya. Sementara itu, nilai korelasi terendah berlokasi di Cairns ( $R = 0,699$ ), namun masih termasuk dalam kategori cukup kuat (Tabel 3). Hal ini sejalan dengan pernyataan Budiono (2017 dalam Sukma & Puspitadewi, 2022), bahwa apabila nilai korelasi dua variabel berkisar antara 0,5 hingga 0,75, maka termasuk dalam kategori kuat.

Nilai bias antara hasil simulasi model dan data *buoy* berkisar antara -0,182 hingga 0,086, yang menunjukkan bahwa tingkat kesalahan model cukup rendah. Nilai bias yang negatif ditemukan pada lokasi Cairns dan Townsville. Hal ini mengindikasikan bahwa tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) yang dihasilkan oleh model SWAN sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan data observasi *buoy* di kedua lokasi tersebut (*overestimate*). Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ribal *et al.* (2020), di mana nilai bias di Albatross bersifat positif, sedangkan pada lokasi Cairns dan Townsville bersifat negatif.

Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk menilai seberapa besar rata-rata deviasi antara hasil simulasi model dengan data observasi *buoy*. Berdasarkan Tabel 3, nilai RMSE berada pada rentang 0,145 hingga 0,213 meter. Lokasi Albatross memiliki nilai RMSE terendah (0,145 m), yang berarti hasil model di lokasi tersebut memiliki tingkat kesesuaian paling tinggi terhadap data observasi. Sementara itu, nilai RMSE tertinggi terdapat di Cairns (0,213 m).

**Tabel 3.** Validasi antara hasil model dan data *buoy* untuk tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ )

Lokasi <i>Buoy</i>	Bias	Korelasi	RMSE
Albatross	0,086	0,711	0,145
Cairns	-0,182	0,699	0,213
Townsville	-0,127	0,921	0,171

Perbandingan antara tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) hasil model SWAN dan data observasi *buoy* dari AODN di tiga lokasi validasi, yaitu Albatross, Cairns, dan Townsville, tersaji pada Gambar 4. Pada lokasi Albatross (Gambar 4.1a), terlihat bahwa hasil model SWAN dan data *buoy* AODN memiliki pola yang mirip, namun terdapat perbedaan nilai  $H_s$  yang cukup besar. Secara keseluruhan, Nilai  $H_s$  dari SWAN terlihat lebih rendah dibandingkan data AODN (*underestimate*). Pada lokasi Cairns (Gambar 4.1b), pola  $H_s$  model SWAN dan data *buoy* AODN terlihat memiliki pola yang mirip. Sementara itu, pada lokasi Townsville (Gambar 4.1c), pola  $H_s$  antara model SWAN dan data AODN terlihat mirip, walaupun pada waktu tertentu  $H_s$  hasil model SWAN terlihat lebih tinggi (*underestimate*), begitu pula sebaliknya.

*Scatter plot* pada ketiga lokasi menunjukkan data berada di sekitar garis gradien=1, hal tersebut menunjukkan bahwa nilai bias data  $H_s$  AODN dan  $H_s$  SWAN memiliki bias yang kecil. Namun terlihat beberapa data yang tersebar agak jauh di atas dan di bawah garis gradien. Sementara itu, histogram menunjukkan persebaran data di lokasi Albatross cenderung ke arah kanan (*overestimate*). Namun, pada lokasi Cairns dan Townsville, histogram menunjukkan penyebaran data cenderung ke arah kiri (*underestimate*).

### Rata-rata Ketinggian Gelombang Tahun 2020-2023

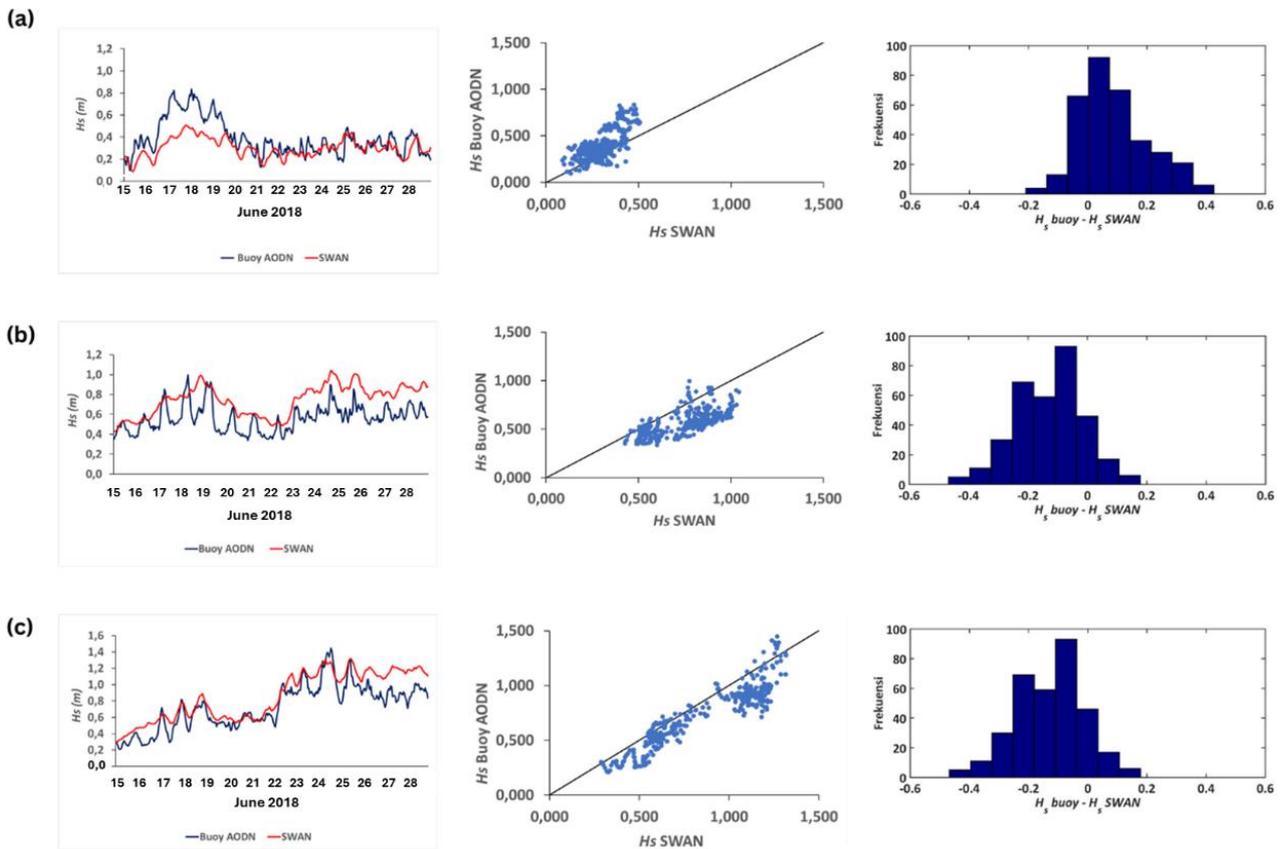
Data angin dan gelombang pada domain regional yang telah divalidasi dijalankan ulang menggunakan skema model *nested*, sehingga menghasilkan data angin dan gelombang dengan resolusi lebih tinggi di wilayah Indonesia. Gambar 5 menyajikan peta rata-rata kecepatan dan arah angin, serta peta tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) model *nested* selama empat tahun, yakni dari tahun 2020 hingga 2023 di perairan Indonesia. Berdasarkan Gambar 5a, pola angin menunjukkan perubahan arah dan kecepatan pada lintang yang berbeda. Kecepatan angin tertinggi tercatat di wilayah selatan Indonesia di perairan Samudra Hindia. Pada lokasi tersebut, angin berhembus dari arah timur menuju barat dengan kecepatan berkisar antara 6 – 9 m/s. Pada perairan tertutup, seperti Selat Malaka dan Selat Makassar, rata-rata kecepatan angin berkisar antara 1-2 m/s.

Tinggi  $H_s$  dan arah pergerakan gelombang juga tampak sesuai dengan pola arah angin. Pada wilayah perairan terbuka, seperti wilayah selatan Indonesia, khususnya di Samudra Hindia bagian selatan Jawa, Bali dan Nusa Tenggara, memiliki nilai  $H_s$  yang lebih tinggi dibanding wilayah lain, yaitu sekitar 2 hingga 2,5 meter. Sebaliknya, pada perairan tertutup, seperti di Laut Jawa, Teluk Bone, dan Selat Makassar, ketinggian  $H_s$  cenderung rendah, yakni berkisar antara 0,5 hingga 1 meter. Hal ini disebabkan oleh lemahnya kekuatan angin pada wilayah tersebut. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Young (1999), bahwa semakin besar angin yang bertiup di atas permukaan air, semakin besar pula gelombang yang akan terbentuk, dan sebaliknya.

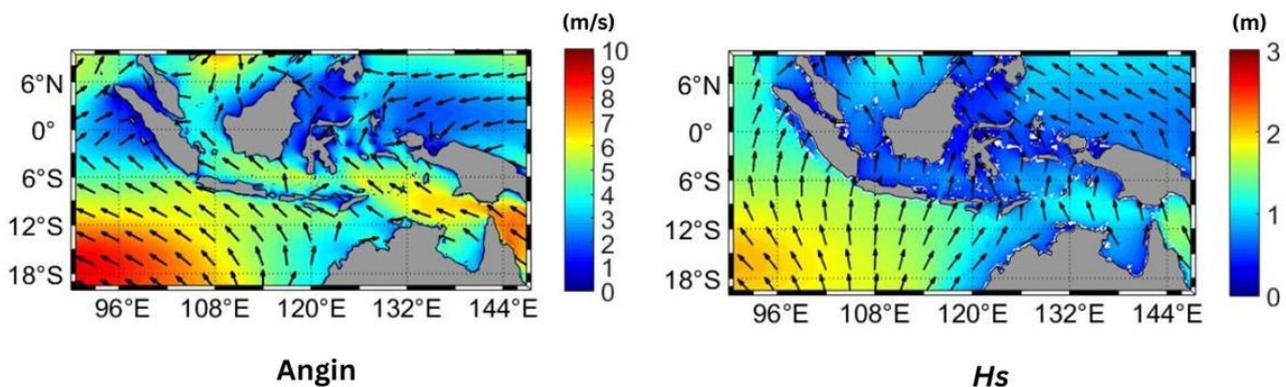
Selain dipengaruhi oleh kecepatan dan durasi tiupan angin, tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) dipengaruhi oleh panjang *fetch*. Pada wilayah perairan terbuka, seperti Samudra Hindia, *fetch* dapat mencapai ratusan kilometer, hal ini memungkinkan angin untuk mentransfer energi ke permukaan laut dalam waktu yang lama sehingga membentuk gelombang yang tinggi dan kuat (Sarman *et al.*, 2022). Oleh karena itu, gelombang pada wilayah tersebut cenderung lebih tinggi. Sebaliknya, di perairan tertutup, seperti yang ditemukan di antara gugusan pulau di Indonesia, *fetch* menjadi sangat terbatas karena terhalang oleh daratan di sekitarnya (Ramli *et al.*, 2025). Akibatnya, energi yang ditransfer dari angin ke permukaan laut menjadi terbatas, maka dari itu gelombang yang terbentuk cenderung lebih rendah (Joseph & Latupeirissa, 2022). Hal ini menyebabkan pada perairan tertutup gelombang lokal (*local wind waves*) lebih banyak terbentuk daripada gelombang *swell*.

### Variasi Musiman Tinggi Gelombang ( $H_s$ )

Setelah dilakukan pemodelan dengan skema *nested*, data angin dan gelombang dianalisis secara musiman untuk melihat pola variabilitasnya dari tahun 2020 hingga 2023. Hasil pemodelan menunjukkan adanya variasi ketinggian dan arah rambat gelombang yang dipengaruhi oleh kecepatan dan arah angin. Secara umum, ketika musim timur berlangsung (Juni-Agustus), nilai kecepatan angin dan tinggi gelombang lebih tinggi dibandingkan musim-musim lainnya (Gambar 6). Pada musim timur, terlihat angin secara umum bergerak dari arah timur menuju arah barat dengan kecepatan yang relatif tinggi terutama di wilayah perairan selatan Indonesia, seperti Samudra Hindia, Bali, Nusa Tenggara, dan Laut Arafura (7-10 m/s). Kondisi ini menyebabkan terbentuknya gelombang signifikan dengan ketinggian lebih dari 2,5 meter di kawasan tersebut (Gambar 6c). Pola pergerakan gelombang secara umum sejalan dengan arah angin, yaitu dari arah barat ke timur. Hasil ini sesuai dengan pernyataan Ribal *et al.* (2020), bahwa di wilayah perairan Indonesia gelombang tertinggi terjadi pada periode musim timur, yakni bulan Juni, Juli, Agustus dengan arah perambatan gelombang dari timur menuju barat.



**Gambar 4.** Perbandingan  $H_s$  antara hasil model SWAN dan buoy pada lokasi validasi. (a) Albatross, (b) Cairns, dan (c) Townsville

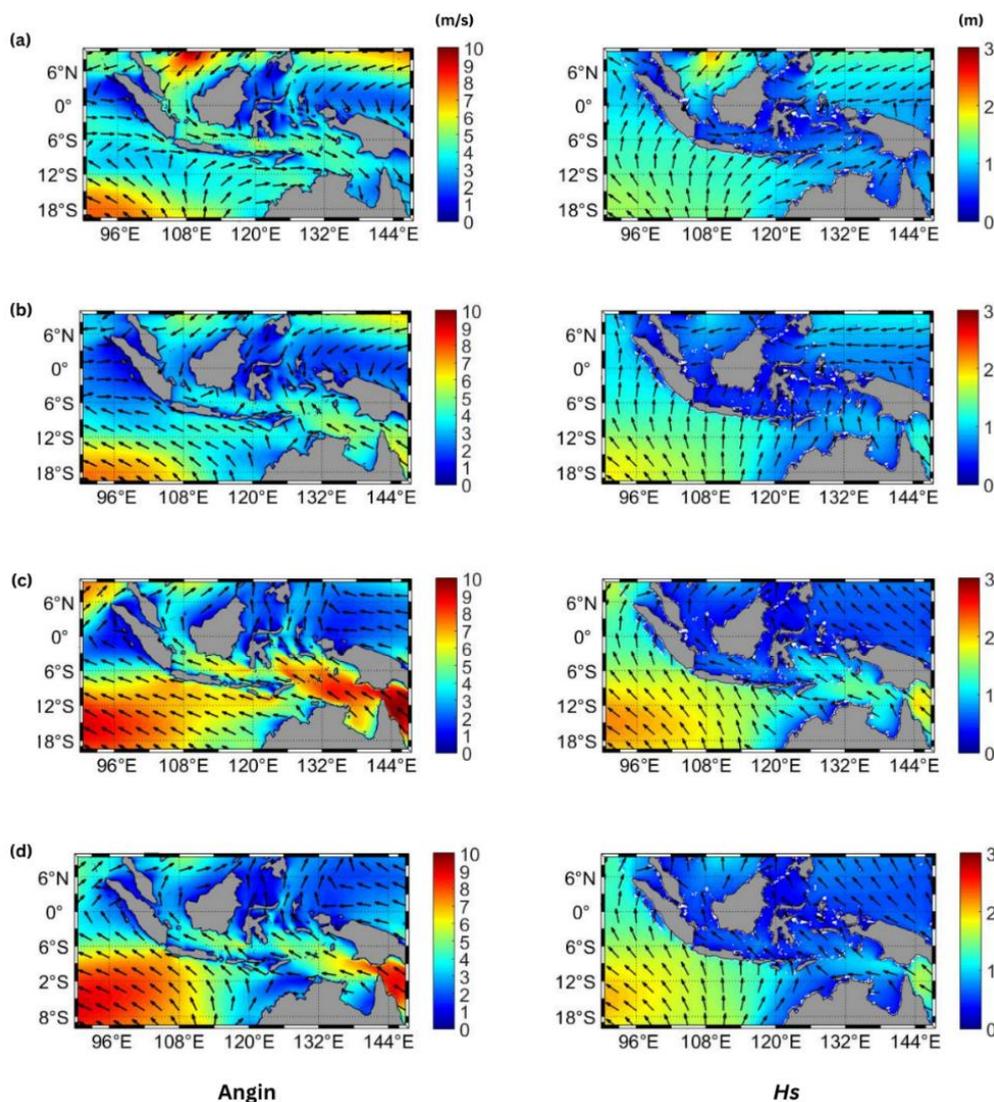


**Gambar 5.** Rata-rata kecepatan angin (a) dan  $H_s$  (b) tahun 2020-2023

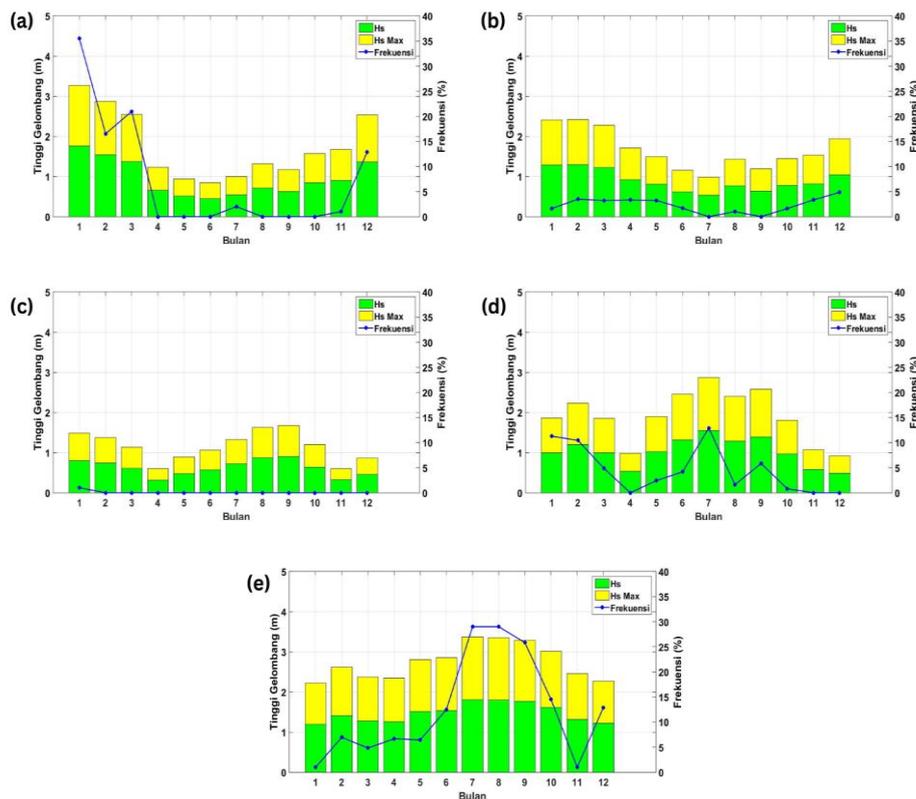
Ketinggian gelombang ( $H_s$ ) terendah terjadi pada musim peralihan I (Maret-Mei). Hal tersebut diduga karena kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan dengan musim-musim lainnya, serta arah pergerakan angin yang cenderung tidak beraturan pada musim tersebut. Kecepatan angin umumnya berkisar antara 1 hingga 4 m/s, dengan arah angin yang bervariasi di berbagai wilayah. Kondisi pola angin ini berpengaruh terhadap pembentukan gelombang laut. Tinggi gelombang pada musim peralihan I umumnya tergolong rendah hingga sedang, dengan kisaran antara 0,5 hingga 2 meter. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan *et al.* (2011), bahwa bahwa pada musim peralihan I (Maret-Mei), kecepatan angin di atas perairan Indonesia relatif rendah sehingga gelombang laut cenderung lebih rendah dibandingkan musim barat dan musim timur. Menurut Ramli *et al.* (2025), musim peralihan I ditandai oleh kondisi angin yang berfluktuasi dan tidak seragam, sehingga gelombang yang terbentuk juga cenderung lebih kecil.

### Variasi Ketinggian Gelombang di Beberapa Wilayah Tertentu

Wilayah Indonesia di utara garis ekuator, seperti Laut Cina Selatan dan Samudra Pasifik, mengalami gelombang tinggi terutama selama musim barat, dengan puncaknya terjadi pada bulan Januari hingga Maret, dan kembali meningkat di bulan Desember (Gambar 7). Sebaliknya, wilayah di selatan ekuator seperti Laut Arafura dan Samudra Hindia cenderung mengalami gelombang tinggi selama musim timur, yang mencapai puncaknya antara bulan Juni hingga September. Pola ini sejalan dengan temuan Kurniawan *et al.* (2012), yang menyatakan bahwa selama monsun Asia (Desember–Februari), gelombang tinggi lebih dominan di wilayah utara ekuator, sedangkan pada periode monsun Australia (Juni–Agustus), gelombang tinggi lebih terkonsentrasi di bagian selatan dan sebagian timur Indonesia. Ketinggian gelombang di Laut Cina Selatan menunjukkan pola musiman yang cukup jelas (Gambar 7a). Nilai  $H_s$  tertinggi terjadi pada bulan Januari, menyentuh angka 1,8 meter, dengan  $H_s$  Max mencapai lebih dari 3 meter. Frekuensi kejadian gelombang tinggi juga paling banyak terjadi di bulan ini, dengan persentase di atas 35%. Setelah Januari, nilai  $H_s$  dan frekuensinya mulai menurun, namun masih cukup tinggi hingga bulan Maret. Memasuki bulan April hingga Oktober, ketinggian gelombang cenderung rendah dan relatif stabil. Nilai  $H_s$  berkisar antara 0,8 hingga 1,2 meter, dengan  $H_s$  Max di bawah 2 meter. Frekuensi kejadian gelombang lebih dari 2 meter hampir tidak muncul selama periode ini. Kenaikan kembali terlihat mulai bulan November hingga Desember. Pada bulan Desember,  $H_s$  kembali meningkat hingga mendekati 1,5 meter, dan  $H_s$  Max mencapai lebih dari 2,5 meter.



**Gambar 6.** Variasi musiman kecepatan angin dan ketinggian gelombang signifikan ( $H_s$ ). (a) musim barat, (b) musim peralihan I, (c) musim timur, (d) musim peralihan II



**Gambar 7.** Rata-rata tinggi gelombang maksimum ( $H_s$  Max), rata-rata tinggi gelombang ( $H_s$ ), Frekuensi tinggi gelombang > 2 m (Frekuensi) tahun 2000-2010. (a) Laut Cina Selatan, (b) Samudra Pasifik, (c) Laut Jawa, (d) Laut Arafura, (e) Samudra Hindia

Distribusi bulanan ketinggian gelombang di wilayah Samudra Pasifik ( $128.4^\circ$  BT,  $6.3^\circ$  LU) menunjukkan adanya variasi musiman (Gambar 7b). Pada bulan Januari dan Februari, rata-rata tinggi gelombang ( $H_s$ ) mencapai nilai maksimum sekitar 1,3 meter, sedangkan tinggi gelombang maksimum ( $H_s$  Max) melebihi 2,5 meter. Frekuensi kejadian gelombang dengan tinggi lebih dari 2 meter sekitar 5–6%. Memasuki bulan Maret hingga Juli, ketinggian gelombang mengalami penurunan dengan nilai  $H_s$  berada di kisaran 0,8 hingga 1,1 meter, sementara  $H_s$  Max tidak melebihi 1,7 meter. Pada bulan Desember,  $H_s$  kembali naik hingga mendekati 1,2 meter, dengan  $H_s$  Max sekitar 2,4 meter dan frekuensi gelombang tinggi mencapai 5%. Pola ini mengindikasikan bahwa gelombang di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh angin muson barat yang berkembang di kawasan Pasifik.

Pada perairan Laut Jawa rata-rata tinggi gelombang ( $H_s$ ) tertinggi tercatat pada bulan Agustus dan September, mencapai sekitar 0,9 meter, dengan  $H_s$  Max mendekati 1,7 meter (Gambar 7c). Meskipun nilainya tidak setinggi wilayah perairan terbuka, nilai ini menunjukkan peningkatan aktivitas gelombang yang pada periode musim timur. Sementara itu, dari bulan April hingga Juni, kondisi gelombang relatif tenang. Nilai  $H_s$  berkisar antara 0,5 hingga 0,7 meter, dengan  $H_s$  Max kurang dari 1,2 meter. Hal serupa juga terjadi pada bulan November dan Desember. Frekuensi kejadian gelombang dengan tinggi lebih dari 2 meter hanya muncul pada bulan Januari saja, pada bulan lain tidak ditemukan adanya gelombang dengan tinggi lebih dari 2 meter.

Rata-rata tinggi gelombang ( $H_s$ ) di Laut Arafura mengalami peningkatan mulai bulan Mei, dan mencapai puncaknya pada bulan Juli dengan nilai sekitar 1,6 meter, sementara  $H_s$  Max menyentuh angka 2,9 meter (Gambar 7d). Frekuensi kejadian gelombang lebih dari 2 meter juga tertinggi di bulan ini, mencapai 15%. Pada periode April hingga Mei, terjadi transisi dari kondisi tenang ke kondisi lebih aktif, diikuti oleh peningkatan signifikan pada bulan Juni hingga Agustus. Hal ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh intensifikasi angin muson timur yang memicu penguatan gelombang di kawasan selatan Indonesia, termasuk Laut Arafura.

Sebaliknya, selama bulan April dan dari Oktober hingga Desember, kondisi gelombang di Laut Arafura cenderung lebih tenang. Rata-rata  $H_s$  berada di bawah 1 meter, dengan  $H_s$  Max berkisar antara 1,2 hingga 1,8 meter. Frekuensi kejadian gelombang tinggi sangat rendah, bahkan tidak ada sama sekali pada bulan April,

November, dan Desember. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan gelombang di Laut Arafura sangat dipengaruhi oleh musim. Pada wilayah tersebut gelombang menguat selama musim timur dan pada musim barat serta peralihan gelombang cenderung lebih lemah. Kondisi gelombang ( $H_s$ ) di Samudra Hindia terlihat cenderung tinggi sepanjang tahunnya dibandingkan dengan lokasi lain (Gambar 7e). Rata-rata tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) cenderung tinggi sepanjang tahun, dengan kisaran 1,2–1,8 meter. Puncak gelombang terjadi pada bulan Juli dan Agustus, dengan  $H_s$  Max mencapai 3,5 meter dan frekuensi kejadian gelombang tinggi menyentuh angka 35%. Periode puncak ini diduga berkorelasi kuat dengan musim timur yang bertiup dari Australia. Sementara itu, pada awal dan akhir tahun (Januari–Maret dan November), gelombang sedikit menurun namun  $H_s$  tetap berada di atas 1 meter, dengan frekuensi kejadian gelombang tinggi di bawah 15%. Hal tersebut menunjukkan bahwa wilayah perairan Samudra Hindia sangat dipengaruhi oleh musim timur dan musim barat, namun pada musim timur pembentukan gelombang lebih tinggi dibandingkan dengan musim barat.

### Korelasi ENSO dengan Anomali Ketinggian Gelombang ( $H_s$ )

Hasil korelasi spasial antara indeks Niño 3.4 dengan anomali tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) ditampilkan pada Gambar 8. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa nilai korelasi antara ENSO dengan anomali tinggi gelombang berkisar antara -0.6 hingga +0.6. Perairan utara Indonesia sebagian besar memiliki nilai korelasi positif. Nilai korelasi tertinggi, yang mencapai sekitar +0.6, teridentifikasi di wilayah Laut Sulawesi, Laut Maluku, dan perairan utara Papua. Korelasi positif ini menunjukkan bahwa saat terjadi fase El Niño (di mana indeks Niño 3.4 bernilai positif), tinggi gelombang di wilayah-wilayah tersebut cenderung mengalami peningkatan dibandingkan kondisi normalnya.

Sementara itu, di wilayah selatan Indonesia, seperti perairan selatan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, menunjukkan nilai korelasi yang relatif netral hingga negatif lemah. Korelasi negatif di wilayah ini berkisar antara -0.2 hingga -0.4. Hal tersebut menunjukkan bahwa saat terjadi El Niño, tinggi gelombang di wilayah tersebut cenderung menurun atau tidak mengalami perubahan signifikan. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan *et al.* (2012), bahwa korelasi antara anomali tinggi gelombang dan ENSO di wilayah selatan Indonesia memiliki nilai korelasi negatif lemah dan cenderung netral pada beberapa lokasi.

Secara umum, El Niño diasosiasikan dengan pelemahan angin pasat dan pergeseran pusat konveksi dari barat ke tengah-timur Pasifik (Bayr *et al.*, 2014). Berdasarkan hal ini, penguatan gelombang di Pasifik Barat saat El Niño tampak berlawanan dengan teori. Namun, studi yang dilakukan Wang *et al.* (1999) menyebutkan bahwa selama fase hangat ENSO, wilayah barat luar ekuator mengalami pendinginan suhu permukaan laut dan peningkatan tekanan permukaan laut yang memicu terbentuknya anomali angin timuran (*easterly anomalies*) di wilayah tersebut. Anomali angin timuran muncul sebagai respons atmosferik terhadap distribusi spasial suhu permukaan laut dan cukup kuat untuk menghasilkan angin permukaan dari timur ke barat di bagian barat jauh Pasifik, meskipun angin pasat melemah.

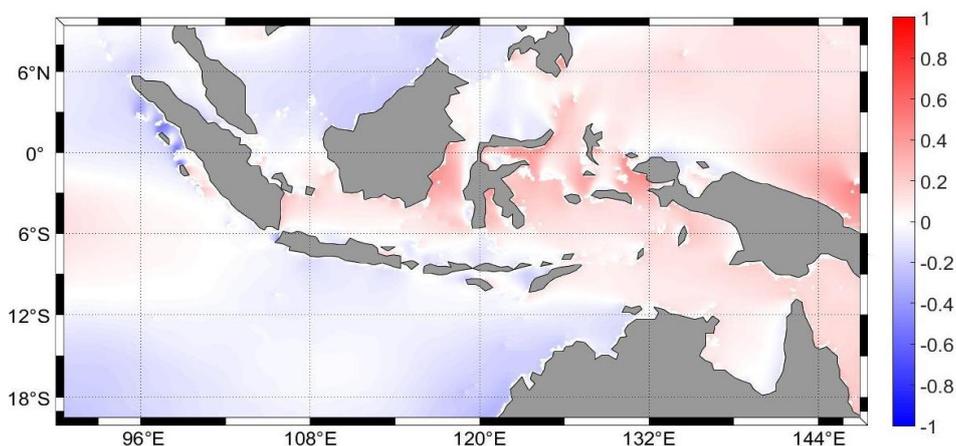
Selain itu, Bayr *et al.* (2014) menunjukkan dalam model iklim global CMIP3 dan CMIP5 terkait tren pelemahan dan pergeseran sirkulasi Walker ke arah timur yang sangat mirip dengan pola ENSO, yaitu pergeseran aktivitas konvektif (zona awan dan hujan) dari wilayah Pasifik barat dekat Indonesia, ke arah timur di Pasifik tengah dan timur akibat pemanasan suhu permukaan laut di wilayah tersebut. Bayr *et al.* (2014) juga menemukan bahwa tren ini tidak merata secara spasial. Pergeseran ini menyebabkan perubahan pola sirkulasi Walker, di mana aktivitas naik (*upward motion*) di Pasifik barat melemah dan bergeser ke timur, sementara di wilayah timur Indonesia terjadi peningkatan tekanan udara tinggi yang menghambat aktivitas konvektif (*downward motion*) (Bayr *et al.*, 2014). Akibatnya, pola angin permukaan juga berubah, termasuk penguatan angin timur di wilayah timur Indonesia. Angin timur yang lebih kuat menyebabkan pembentukan gelombang laut yang lebih tinggi di wilayah tersebut.

Menurut Aldrian (2008), El Niño biasanya dimulai pada April dan mencapai puncaknya pada Agustus hingga September. Pada bulan Juni hingga Agustus, angin monsun Australia yang bertiup dari Tenggara ke Barat Laut lebih dominan di wilayah Indonesia. Saat El Niño terjadi, angin ini melemah sehingga tinggi gelombang di Samudra Hindia bagian Selatan Jawa menjadi lebih rendah dari rata-rata, sebaliknya, gelombang di wilayah yang dekat dengan Samudra Pasifik justru meningkat (Kurniawan *et al.*, 2012). Saat La Niña terjadi, angin dari Pasifik menguat dan memperkuat monsun Australia, menyebabkan gelombang di Selatan Jawa lebih tinggi, sementara di wilayah dekat Samudra Pasifik justru lebih rendah.

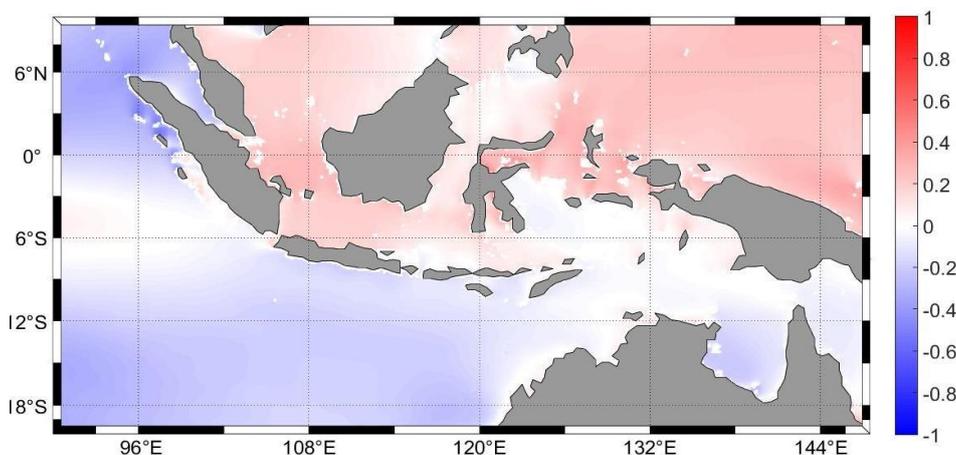
**Korelasi IODM dengan Anomali Ketinggian Gelombang ( $H_s$ )**

Analisis hubungan antara fenomena *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM) dan tinggi gelombang signifikan di wilayah Indonesia menghasilkan pola korelasi yang bervariasi antar wilayah. Secara umum, terlihat bahwa sebagian besar wilayah selatan Indonesia, mulai dari perairan barat daya Sumatera, selatan Jawa, Bali, hingga selatan Nusa Tenggara, menunjukkan korelasi negatif yang cukup kuat, dengan nilai berkisar antara -0,4 hingga -0,8. Hal ini menunjukkan bahwa saat nilai IODM meningkat (fase positif), tinggi gelombang signifikan di wilayah tersebut cenderung menurun (Gambar 9). Di sisi lain, wilayah utara Indonesia seperti perairan Kalimantan dan Sulawesi bagian utara hingga Papua menunjukkan korelasi positif dengan nilai antara 0,2 hingga 0,6. Hal tersebut menandakan bahwa selama fase IOD positif, ketika suhu muka laut di Samudra Hindia bagian barat menghangat dibandingkan bagian timurnya, terjadi peningkatan tinggi gelombang di wilayah utara Indonesia.

Hasil perhitungan korelasi ini bertentangan dengan teori yang ada. Saat IODM positif, SST di barat Samudra Hindia menjadi lebih hangat, sementara di timur (dekat Indonesia) lebih dingin, hal itu menyebabkan tekanan udara lebih rendah di barat dan lebih tinggi di timur Samudra Hindia (Taruna *et al.*, 2019). Akibatnya, terjadi penguatan angin dari wilayah bertekanan tinggi (timur) ke wilayah bertekanan rendah (barat). Angin ini meningkatkan kecepatan angin permukaan laut di perairan barat Sumatera dan Selat Malaka, yang secara langsung memicu pembentukan gelombang laut yang lebih tinggi di sana (Azuga *et al.*, 2020). Namun, hasil perhitungan korelasi tidak menunjukkan pola tersebut.



**Gambar 8.** Korelasi antara indeks ONI dengan anomali ketinggian gelombang periode 2020 hingga 2023



**Gambar 9.** Korelasi antara indeks DMI dengan anomali ketinggian gelombang periode 2020 hingga 2023

Ketidakesuaian hasil dengan teori diduga disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor pertama yaitu rentang waktu data yang digunakan. Pada penelitian ini, periode data yang digunakan memiliki jangka waktu yang relatif pendek, yaitu dari 2020 hingga 2023 (4 tahun), sehingga pola hubungan jangka panjang belum dapat terlihat dengan jelas. Berbeda dengan studi yang dilakukan oleh Krisnanto *et al.* (2024) dan Kertayasa *et al.* (2013), yang menggunakan data IODM dengan jangka waktu 9-13 tahun.

Selain itu, faktor ENSO (*El Niño–Southern Oscillation*) juga bisa mempengaruhi hasil perhitungan korelasi antara IODM dan anomali tinggi gelombang. ENSO merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi pola angin dan tekanan atmosfer di wilayah Indo-Pasifik. Pada kondisi tertentu, ENSO dan IODM dapat terjadi secara bersamaan atau bahkan pada fase yang saling berlawanan, sehingga pengaruhnya bisa saling mendukung atau bahkan bertolak belakang. Oleh karena itu, tidak menutup kemungkinan bahwa anomali tinggi gelombang yang terjadi pada wilayah Indonesia dalam periode 2020 hingga 2023 lebih dipengaruhi oleh ENSO dibandingkan IODM.

Berdasarkan Gambar 3, ketika DMI berada dalam kondisi netral, namun ONI menunjukkan anomali yang jelas (baik La Niña maupun El Niño), maka anomali gelombang yang diamati di wilayah Indonesia diduga lebih dipengaruhi oleh kondisi ENSO daripada IOD. Akibatnya, hasil korelasi antara DMI dan anomali tinggi gelombang pada periode tersebut cenderung bertolak belakang dengan pola umum yang menunjukkan hubungan positif antara DMI dan gelombang.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa model SWAN mampu memprediksi tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) cukup akurat, dengan nilai korelasi yang cukup tinggi ( $R = 0,699–0,921$ ). Gelombang tertinggi terjadi pada musim timur (Juni–Agustus), sedangkan gelombang terendah terjadi pada musim peralihan I (Maret–Mei). Analisis tinggi gelombang lanjutan di lima lokasi studi menunjukkan bahwa ketika musim barat gelombang tinggi lebih dominan terjadi di wilayah utara Indonesia, namun ketika musim timur gelombang tinggi dominan terjadi di wilayah selatan Indonesia. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa ENSO memberikan pengaruh signifikan terhadap anomali tinggi gelombang, terutama di wilayah utara Indonesia selama fase El Niño. Sementara itu, pengaruh IODM terlihat lebih menonjol di wilayah selatan, namun korelasinya cenderung lemah, diduga disebabkan oleh keterbatasan periode data yang digunakan serta adanya interaksi dengan fenomena ENSO.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adriat, R., Muhandi, M., Risko, R., & Ramat, M. F. 2024. Karakteristik Gelombang Laut di Perairan Pantai Samudra Indah Kabupaten Bengkayang Kalimantan Barat. *Manfish Journal*, 5(1): 32-37. <https://doi.org/10.31573/manfish.v5i1.725>
- Aldrian, E. 2008. *Meteorologi laut Indonesia*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).
- Azuga, N. A., & Galib, M. 2020. Analyzing the Effect of Indian Ocean Dipole Phenomenon to the Anomalies Distribution of Sea Surface Temperature in West Sumatera. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 3(3): 260-270. <https://doi.org/10.31258/ajaoas.3.3.260-270>
- Bayr, T., Dommengot, D., Martin, T., & Power, S. B. 2014. The Eastward Shift of The Walker Circulation in Response to Global Warming And its Relationship to ENSO Variability. *Climate dynamics*, 43(1): 2747-2763. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2091-y>
- Claudia, S. G., Siregar, Y. I., & Mubarak, M. 2023. The Effect of The Indian Ocean Dipole (Iod) Phenomenon on Oceanographic Parameters In The Malacca Strait. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 6(2): 210–223. <https://doi.org/10.31258/ajaoas.6.2.210-223>
- Fan, Y., Lin, S.-J., Griffies, S. M., & Hemer, M. A. 2014. Simulated Global Swell and Wind-Sea Climate and Their Responses to Anthropogenic Climate Change at the End of the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 27(10): 3516–3536. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00198.1>
- Habibie, M. N., & Fitria, W. 2019. Kajian indeks variabilitas tinggi gelombang signifikan di Indonesia. *Jurnal Segara*, 14(3): 159-168. <https://doi.org/10.15578/segara.v14i3.6650>
- Hamid, A. R., Tawas, H. J., & Jasin, M. I. 2023. Analisis Karakteristik Gelombang Di Pantai Kahona Lembah Selatan Kota Bitung Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 11(1): 1-10.

- Joseph, C., & Latupeirissa, E. O. 2022. Analisa Perubahan Garis Pantai Dan Perencanaan Bangunan Pelindung Pantai Di Negeri Amdua Kecamatan Amahai Kabupaten Maluku Tengah. *Manumata: Jurnal Ilmu Teknik*, 8(2): 152-166.
- Kashima, H., Hirayama, K., Mori, N., & Mase, H. 2014. Characteristics of Wave Pressure with Occurrence Frequency of Maximum Wave Heights. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 70(2): I\_1021-I\_1025. [https://doi.org/10.2208/kaigan.70.i\\_1021](https://doi.org/10.2208/kaigan.70.i_1021)
- Kertayasa, I. M., Sukarasa, I. K., Widagda, I. G. A., & Hendrawan, I. G. 2013. Pengaruh Indian Ocean Dipole Mode (Iodm) Terhadap Intensitas Hujan di Benua Maritim Indonesia (Bmi) Barat. *Buletin Fisika*, 14(1): 23-50.
- Krisnanto, W. F., Sartimbul, A., Pranowo, W. S., Sari, S. H. J., & Setyawan, F. O. 2024. Studi Eksperimen Indeks El Niño Southern Oscillation & Indian Ocean Dipole di Indonesia dengan Memanfaatkan Oceanic Niño Index dan Dipole Mode Index (Studi Kasus: Tahun 2009–2020). *Jurnal Chart Datum*, 10(1): 23-38. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v10i1.332>
- Kunarso, Ismanto, A., Putra Situmorang, R., & Wulandari, S.Y. 2018. Variability of Upwelling in Bone Bay and Flores Sea. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(10): 742–751.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N., & Permana, D. S. 2012. Kajian daerah rawan gelombang tinggi di Perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(3): 201-2012. <https://doi.org/10.31172/jmg.v13i3.135>
- Lail, A., Setiyadi, J., & Pranowo, W. S. 2018. Karakteristik Gelombang Laut untuk Informasi Pembangunan Dermaga (Studi Kasus Lanal Tahuna). *Jurnal Hidropilar*, 4(2): 69-76. <https://doi.org/10.37875/hidropilar.v4i2.188>
- Milansi R. 2023. Apa Perbedaan Gelombang, Arus Dan Pasang Surut Air Laut?. *Elementa Media.NOAA*. 2024. <https://www.climate.gov/enso>.
- Prarikeslan, W. 2016. *Oseanografi*. Kencana.
- 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. DOI: 10.14710/ijoce.v3i2.11392
- Ramli, Pratikino, A. G., & Palupi, R. D. 2025. Karakteristik Gelombang (Tinggi Gelombang Signifikan) di Teluk Mekongga, Perairan Kolaka Sulawesi Tenggara Menggunakan Data Satelit Altimetri. *Jurnal Laut Pulau: Hasil Penelitian Kelautan*, 4(1): 22-35.
- 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>
- Safda, S. P., Danial, M. M., & Lestari, A. D. 2024. Gelombang Laut Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Di Perairan Pantai Utara Kabupaten Sambas Kalimantan Barat. *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, 11(1): 1-8.
- Sarman, Ramli, M., & Pratikino, A. G. 2022. Karakteristik Gelombang di Perairan Timur Kecamatan Kulisusu Utara Kabupaten Buton Utara. *Jurnal Sapa Laut*, 7(2): p.87. <https://doi.org/10.33772/jsl.v7i2.27285>
- Sebayang, I.S.D. & Kurniadi, A. 2015. Identifikasi Dan Analisis Kerusakan Garis Pantai Tanjung Pasir di Kabupaten Tangerang, Banten. *Rekayasa Sipil*, 4(1): 11–20.
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Murtugudde, R., & Susanto, R. D. 2000. A Semiannual Indian Ocean Forced Kelvin Wave Observed in The Indonesian Seas in May 1997. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C7): 17217-17230. <https://doi.org/10.1029/2000jc900065>
- Taruna, A. R., Widagdo, S., & Prasetyo, E. 2019. Kaitan Fase IOD dengan Faktor Met-Ocean di Perairan Barat dan Selatan Sumatera. *Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal of Tropical Marine Research)(J-Tropimar)*, 1(1): 42-53. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v1i1.21>
- Young, I. R. 1999. *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier.