

STUDI KARAKTERISTIK GELOMBANG DI PERAIRAN SELAT MAKASSAR MENGGUNAKAN MODEL NUMERIK SPEKTRUM GELOMBANG RESOLUSI TINGGI

**Puguh Dwi Oktauvan Damyanto¹, Samuel Radityo Adiprabowo²,
Furqon Alfahmi³, Ngurah Made Darma Putra⁴, Upik Nurbaiti⁵, Ian Yulianti⁶**
Universitas Negeri Semarang^{1,4,5,6}
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika^{2,3}
puguh_oktauvan@students.unnes.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik gelombang dan swell di Selat Makassar selama tahun 2021 menggunakan model numerik SWAN beresolusi tinggi. Data angin dari GFS dan kondisi batas dari BMKG digunakan untuk simulasi gelombang signifikan, dengan resolusi spasial $0,01^\circ$. Hasil simulasi dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk memahami pola spasial dan temporal gelombang. Penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika gelombang di Selat Makassar dipengaruhi oleh monsun barat laut dan tenggara, dengan tinggi gelombang signifikan rata-rata dalam kategori rendah (0,5–1,25 meter) selama musim barat laut, dan rendah hingga sedang (0,5–2,5 meter) selama musim tenggara. Arah swell mencerminkan pola monsun dengan kategori dominan tenang (0,1–0,5 meter). Korelasi positif antara kecepatan angin dan tinggi gelombang (koefisien korelasi 0,36) menunjukkan kontribusi angin terhadap pembentukan gelombang, meskipun faktor lain seperti arus laut turut memengaruhi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola angin, gelombang signifikan, dan swell di Selat Makassar tahun 2021 dipengaruhi oleh dinamika monsun barat laut dan tenggara. Monsun barat laut menghasilkan angin lemah hingga sedang (2–15 knot) dengan gelombang rendah (0,5–1,25 m), sedangkan monsun tenggara menghasilkan angin lebih kuat dengan gelombang rendah hingga sedang (0,5–2,5 m). Swell didominasi kategori tenang (0,1–0,5 m) sepanjang tahun, mengikuti perubahan arah monsun. Simpulan, korelasi antara kecepatan angin dan tinggi gelombang menunjukkan hubungan lemah ($r = 0,36$), menandakan adanya pengaruh faktor lain seperti arus laut dan swell regional.

Kata Kunci: Gelombang Signifikan, Selat Makassar, Swell, SWAN, Monsun.

ABSTRACT

This study aims to analyze wave and swell characteristics in the Makassar Strait during 2021 using a high-resolution SWAN numerical model. Wind data from the GFS and boundary conditions from the BMKG were used to simulate significant waves, with a spatial resolution of 0.01° . The simulation results were analyzed descriptively and quantitatively to understand the spatial and temporal patterns of waves. This study shows that wave dynamics in the Makassar Strait are influenced by the northwest and southeast monsoons, with average significant wave heights in

the low category (0.5–1.25 meters) during the northwest monsoon, and low to moderate (0.5–2.5 meters) during the southeast monsoon. The swell direction reflects the monsoon pattern with a predominantly calm category (0.1–0.5 meters). A positive correlation between wind speed and wave height (correlation coefficient 0.36) indicates the contribution of wind to wave formation, although other factors such as ocean currents also influence. The results show that wind patterns, significant waves, and swell in the Makassar Strait in 2021 were influenced by the dynamics of the northwest and southeast monsoons. The northwest monsoon produces weak to moderate winds (2–15 knots) with low waves (0.5–1.25 m), while the southeast monsoon produces stronger winds with low to moderate waves (0.5–2.5 m). Swell is predominantly calm (0.1–0.5 m) throughout the year, following changes in monsoon direction. In conclusion, the correlation between wind speed and wave height shows a weak relationship ($r = 0.36$), indicating the influence of other factors such as ocean currents and regional swell.

Keywords: *Significant Waves, Makassar Strait, Swell, SWAN, Monsoon.*

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, pemodelan numerik memiliki peranan penting dalam memahami dan memprediksi karakteristik gelombang laut di berbagai wilayah. Model seperti SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) telah digunakan secara luas karena kemampuannya dalam memprediksi kondisi gelombang, baik di wilayah pesisir maupun lepas pantai (Wu et al., 2024). Model ini mampu memberikan solusi yang akurat melalui pemodelan interaksi spektrum gelombang, yang mencakup proses-proses seperti *white-capping*, *bottom friction*, dan interaksi antar-gelombang, sehingga memungkinkan prediksi yang tepat untuk mendukung Pembangunan infrastruktur laut, keselamatan pelayaran, serta mitigasi risiko di daerah pesisir (Li et al., 2024).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa model SWAN dapat memberikan hasil yang memadai di berbagai lokasi penelitian. Salah satu penelitian dilakukan oleh (Wurjanto & Mukhti, 2021) menggunakan model SWAN untuk prediksi tinggi

gelombang di perairan Indonesia, dan menunjukkan hasil yang akurat dalam memodelkan kondisi gelombang di perairan dangkal. Studi di wilayah perairan Indonesia lainnya dilakukan di Teluk Jakarta, juga menunjukkan efektivitas model SWAN dalam memprediksi pengurangan tinggi gelombang di sekitar tanggul laut. Hal ini menunjukkan bahwa model SWAN dapat mendukung perencanaan perlindungan pesisir (Latief, R.N & Adytia, D., 2019). Sementara itu, penelitian oleh Widyani et al. (2024) di pesisir selatan Banten menggunakan model SWAN untuk mengidentifikasi karakteristik gelombang selama siklon tropis Dahlia, yang menunjukkan bahwa fenomena atmosfer ekstrem memiliki dampak signifikan pada pola gelombang di perairan ini.

Selain itu penelitian Teluk Chabahr oleh Pakhirehzan & Malakooti (2024) memanfaatkan model SWAN untuk menganalisis pola gelombang selama musim panas Monsun, menunjukkan hasil yang baik dalam memprediksi pola gelombang yang dipengaruhi oleh angin. Studi

lainnya oleh Umesh & Behera (2021) juga membuktikan bahwa kombinasi model SWAN dan SWASH dapat meningkatkan akurasi prediksi gelombang di pesisir timur India, terutama selama kondisi cuaca ekstrem, seperti saat terjadinya Siklon Hudhud. Penelitian oleh Li et al. (2024) tentang karakteristik gelombang global menggunakan model SWAN menunjukkan kemampuan model ini dalam mengidentifikasi distribusi spasial dan temporal dari gelombang signifikan secara global, yang dapat menjadi referensi penting dalam perencanaan infrastruktur laut.

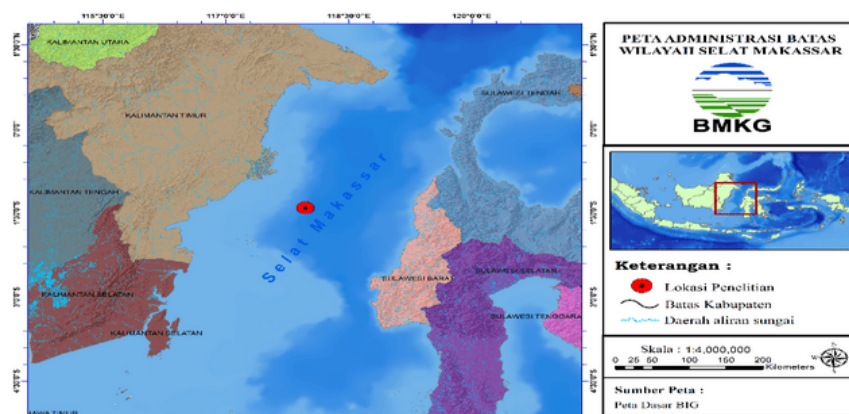
Selat Makassar merupakan perairan yang strategis sebagai jalur penghubung antara Laut Jawa dan Laut Sulawesi serta memiliki karakteristik laut yang unik. Perairan ini dipengaruhi oleh arus laut, angin musiman, serta fenomena iklim global seperti El Nino dan La Nina, yang semuanya berdampak pada pola gelombang laut (Li *et al.*, 2024; Umesh & Behera, 2021). Namun hingga saat ini, penelitian tentang karakteristik gelombang di Selat Makassar masih terbatas, khususnya terkait pengaruh fenomena iklim dan atmosfer terhadap dinamika gelombang di perairan ini.

Dengan menggunakan model SWAN beresolusi tinggi, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gelombang di Selat Makassar, memberikan pemahaman lebih dalam tentang distribusi spasial dan temporal dari gelombang signifikan, serta menganalisis pengaruh fenomena iklim seperti monsun dan siklon tropis terhadap kondisi gelombang di perairan ini.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting bagi perencanaan aktivitas kelautan dan pengelolaan pesisir di Selat Makassar, serta menambah wawasan mengenai implementasi model numerik spektrum gelombang untuk wilayah perairan Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode deterministik berbasis model simulasi numerik spektrum gelombang dengan model SWAN (Jialei et al., 2023) dan dilengkapi dengan analisis deskriptif kuantitatif (Islek & Yuksel, 2021) untuk menganalisis karakteristik gelombang dan swell di Selat Makassar pada tahun 2021.



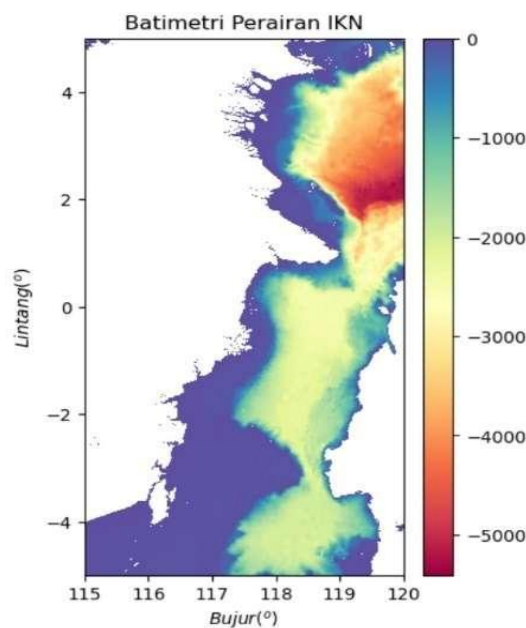
Gambar 1.
Peta Lokasi Penelitian

Model SWAN digunakan untuk menghitung parameter gelombang signifikan dan swell dengan mempertimbangkan data angin, batimetri, serta *boundary condition* dari model global. Simulasi dilakukan di domain lokal Selat Makassar dengan grid resolusi tinggi ($0,01^\circ$), mencakup periode selama satu tahun penuh (2021), dengan hasil yang divisualisasikan dalam bentuk peta spasial.

Lokasi penelitian mencakup wilayah Selat Makassar (Gambar 1), yang terletak di antara Pulau Kalimantan di sebelah barat dan Pulau Sulawesi di sebelah timur. Selat ini merupakan jalur laut yang penting secara geografis dan ekonomis, menghubungkan Laut Jawa dengan Laut Sulawesi. Wilayah penelitian didefinisikan dengan koordinat geografis 1° LU hingga 5° LS dan 118° BT hingga 120° BT. Selat Makassar dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki dinamika gelombang yang

dipengaruhi oleh monsun musiman, arus laut, dan kedalaman yang bervariasi.

Data angin yang digunakan berasal dari GFS (*Global Forecast System*) dengan resolusi temporal 6 jam dan spasial $0,25^\circ$. Data ini berfungsi sebagai input untuk membangkitkan gelombang melalui mekanisme S_{in} dalam model SWAN. Selain itu, data *boundary condition* diperoleh dari BMKG OFS WAVEWATCH-III, yang menyediakan informasi spektrum gelombang di batas domain simulasi. Parameter seperti tinggi gelombang signifikan (H_s), periode (T_p), dan arah propagasi (θ) digunakan untuk menentukan kondisi batas. Data batimetri BATNAS diambil dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan resolusi spasial 6 *arc-second* (Gambar 2), yang digunakan untuk menghitung efek kedalaman terhadap propagasi, disipasi, dan refraksi gelombang.



Gambar 2.
Batrimetri Selat Makassar

Sumber : BIG (2023)

Model SWAN didasarkan pada persamaan keseimbangan aksi gelombang, yang dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(c_g + U)N] + \frac{\partial(c_g N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Dimana $N(x, y, t, \sigma, \theta)$ adalah densitas aksi gelombang, ∇_x adalah gradien spasial, c_g adalah kecepatan grup gelombang, U adalah kecepatan arus laut, dan S_{tot} mencakup komponen sumber dan sink energi seperti pembangkitan oleh angin (S_{in}) dan disipasi oleh whitecapping ($S_{ds,w}$) (Napitupulu, G et al., 2021).

Hasil simulasi SWAN berupa data spasial tinggi gelombang signifikan dan swell untuk setiap bulan pada tahun 2021. Analisis dilakukan dengan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk

menggambarkan pola spasial dan temporal gelombang. Peta distribusi spasial digunakan untuk mengidentifikasi area dengan gelombang yang tinggi atau arah swell yang dominan. Analisis pola temporal dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi antar musim, yaitu musim barat (Desember-Februari), musim timur (Juni-Agustus), dan musim peralihan (Maret-Mei dan September-November). Analisis statistik meliputi perhitungan Korelasi antara kecepatan angin dan gelombang dihitung menggunakan koefisien korelasi Pearson, dengan rumus sebagai berikut:

$$r = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 \Sigma(y_i - \bar{y})^2}}$$

Dengan hasil intrepertasi merujuk pada Sugiyono (2010) :

Tabel 1.
Hasil interpretasi keterkaitan antar variabel

Nilai korelasi	Intrepertasi Keterkaitan Antar Variabel
0,00 - 0,199	Sangat lemah
0,20 - 0,399	Lemah
0,40 - 0,599	Sedang
0,60 - 0,799	Kuat
0,80 - 1,0	Sangat Kuat

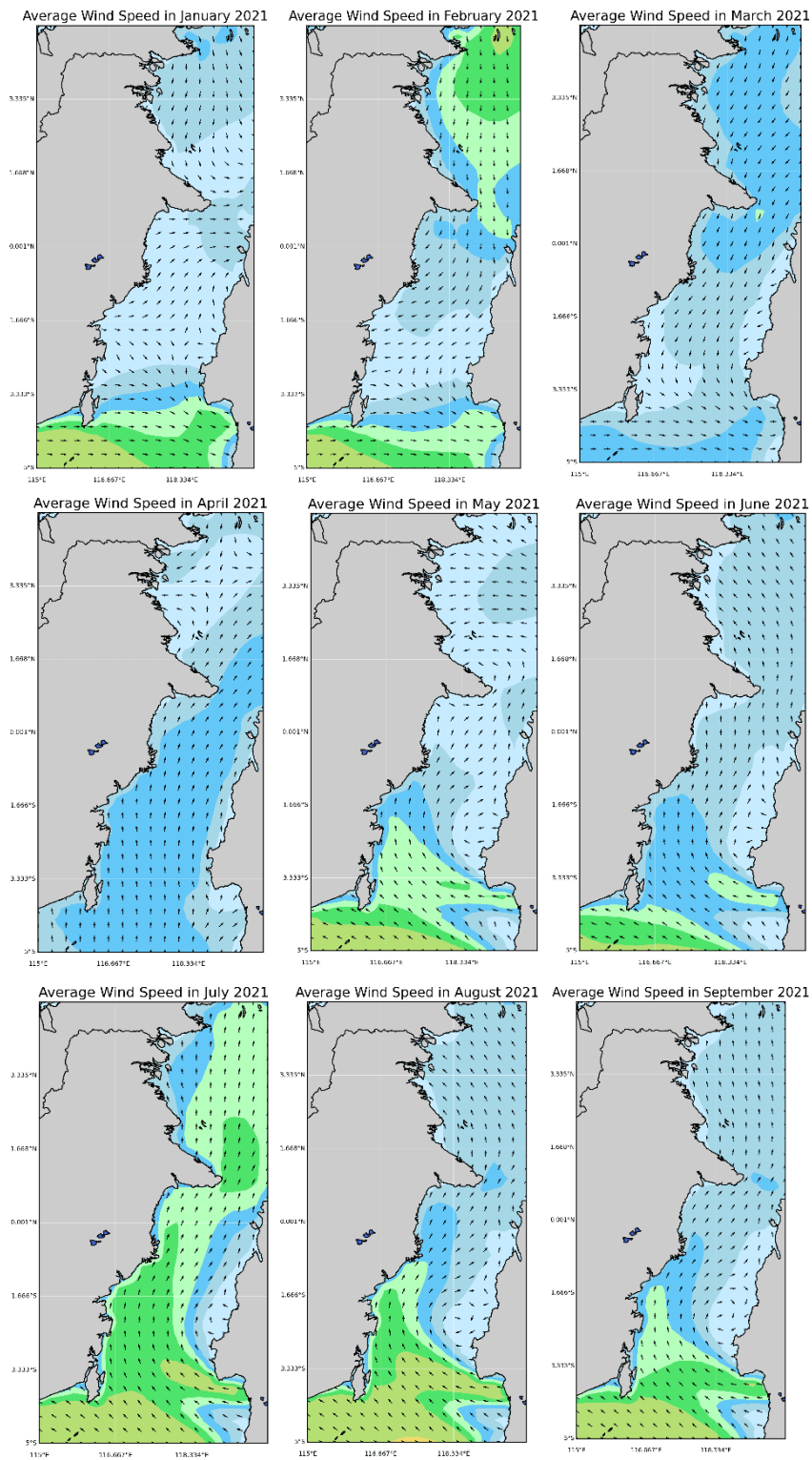
Metode penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif tentang pola gelombang dan swell di Selat Makassar berdasarkan hasil simulasi numerik. Melalui pendekatan secara deskriptif kuantitatif, penelitian ini diharapkan mampu mengidentifikasi pola spasial dan temporal gelombang untuk mendukung perencanaan aktivitas maritim dan memberikan informasi yang tepat dan

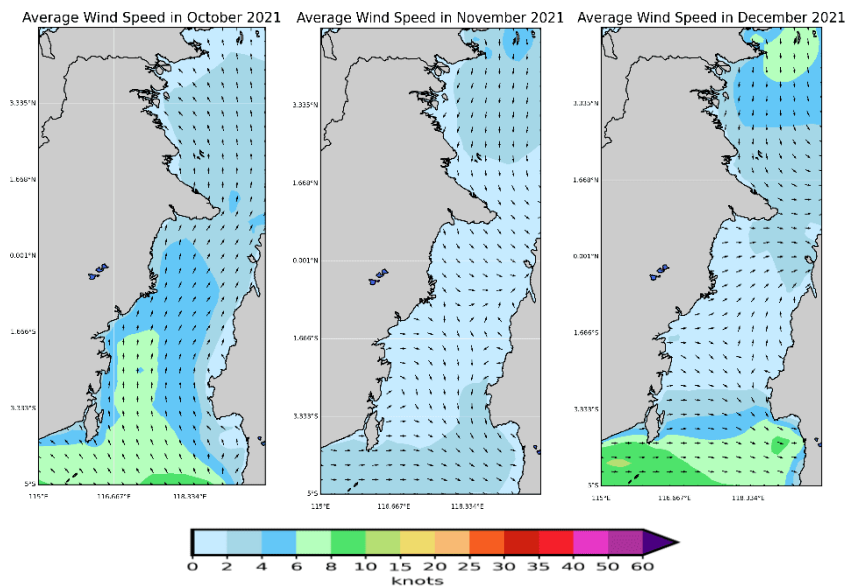
berguna bagi pengelolaan wilayah pesisir.

HASIL PENELITIAN

Bagian ini memaparkan analisis pola angin, gelombang signifikan, dan swell di Selat Makassar selama tahun 2021. Hasil analisis menunjukkan adanya pengaruh kuat dari dinamika monsun, khususnya monsun barat laut dan tenggara, terhadap variasi temporal

dan spasial dari gelombang dan swell di wilayah penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa angin monsun memainkan peran penting dalam pembentukan pola arus dan energi gelombang di Selat Makassar.





Gambar 3.
Peta Spasial Angin di Wilayah Selat Makassar Tahun 2021

Klasifikasi Kecepatan Angin:

Tabel 2.
Klasifikasi Kecepatan Angin

<10 knot	10 - 15 knot	16 - 30 knot	>38 knot
Lemah	Sedang	Kencang	Sangat Kencang

Pada bulan Desember 2021, angin dominan berasal dari arah Utara hingga Timur Laut dengan kecepatan rata-rata dalam kategori lemah hingga sedang (2–15 knot), hal ini, mencerminkan pengaruh monsun barat laut yang membawa kelembapan dari Laut China Selatan. Sementara di wilayah selatan terdapat zona dengan kecepatan angin lebih tinggi mencapai 15 knot dan adanya belokan angin disekitar Pesisir Mamuju. Pada Januari 2021, pola angin serupa terlihat dengan dominasi dari utara hingga timur laut dan kecepatan rata-rata lemah hingga sedang, beberapa wilayah perairan terbuka menunjukkan intensitas yang lebih tinggi, sekitar 10-15 knot. Pada Februari 2021, arah angin tetap dari utara hingga timur laut dengan

kecepatan bervariasi, sebagian besar dalam kategori lemah hingga sedang, namun beberapa wilayah di perairan selatan mencapai 15 knot. Pada Maret 2021, angin tetap dominan dari utara hingga timur laut dengan penurunan kecepatan dari bulan sebelumnya menjadi kategori lemah berkisar antara 2-6 knot, hal ini menunjukkan awal transisi menuju periode monsun peralihan.

Pada bulan April dan Mei 2021, pola angin menunjukkan transisi dari monsun barat ke monsun timur. Pada April, angin didominasi dari arah Selatan dengan kecepatan sebagian besar pada kategori lemah (<10 knot). Pada Mei, arah angin berubah dominan dari Timur-Tenggara, mencerminkan

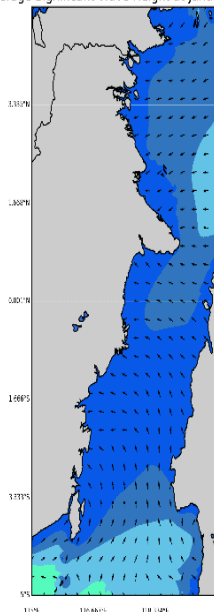
pengaruh monsun timur yang mulai berkembang, dengan kecepatan angin kategori lemah hingga sedang di bagian selatan. Selain itu pola eddy juga terpantau di sekitar peisisir Kutai Timur.

Berdasarkan peta kecepatan angin rata-rata di bulan Juni hingga September 2021, pola angin menunjukkan dominasi arah angin dari Selatan dan Tenggara yang menunjukkan adanya pengaruh angin monsun timur yang berasal dari Australia (Varikoden, H., et al., 2025). Di bulan Juni, kecepatan angin sebagian besar berkisar antara 2-15 knot (kategori lemah - sedang) dengan intensitas lebih rendah di wilayah bagian utara. Pada bulan Juli, kecepatan angin sedang 6-15 knot meluas hingga kebagian tengah. Pola eddy teridentifikasi di sekitar pesisir Mamuju. Pada bulan September, terdapat penurunan kecepatan angin di sebagian besar wilayah, dengan rata-rata kecepatan angin kembali pada

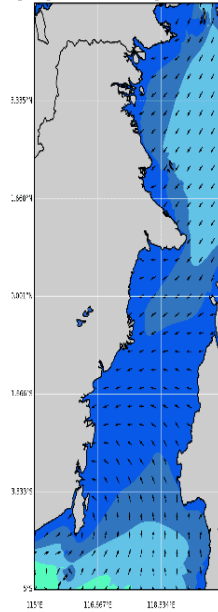
kategori lemah (2-8 knot), namun masih ada area di bagian selatan yang mencatat kecepatan di atas 10 knot.

Pada bulan Oktober 2021, kecepatan angin didominasi dalam kategori lemah hingga sedang (kurang dari 15 knot) di sebagian besar wilayah. Angin bergerak dari arah Selatan hingga Tenggara. Wilayah dengan kecepatan angin sedang terlihat di selatan peta, menunjukkan pengaruh angin monsun timur yang masih bertahan. Pada bulan November 2021, pola angin mulai melambat, menunjukkan transisi ke musim penghujan dengan angin yang berhembus lebih dominan dari arah Utara hingga Timur Laut. Kecepatan angin berada dalam kategori lemah, dengan area lemah yang lebih luas dibandingkan bulan sebelumnya. Hal ini mencerminkan pengaruh awal monsun barat yang membawa uap air dari Laut China Selatan sehingga dapat meningkatkan potensi curah hujan di wilayah ini.

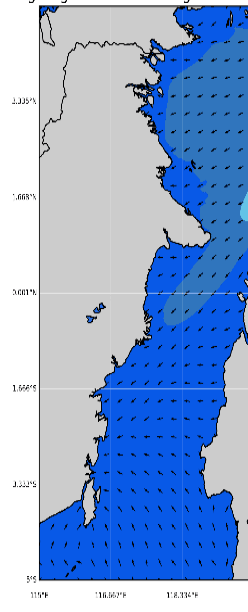
Average Significant Wave Height at January 2021

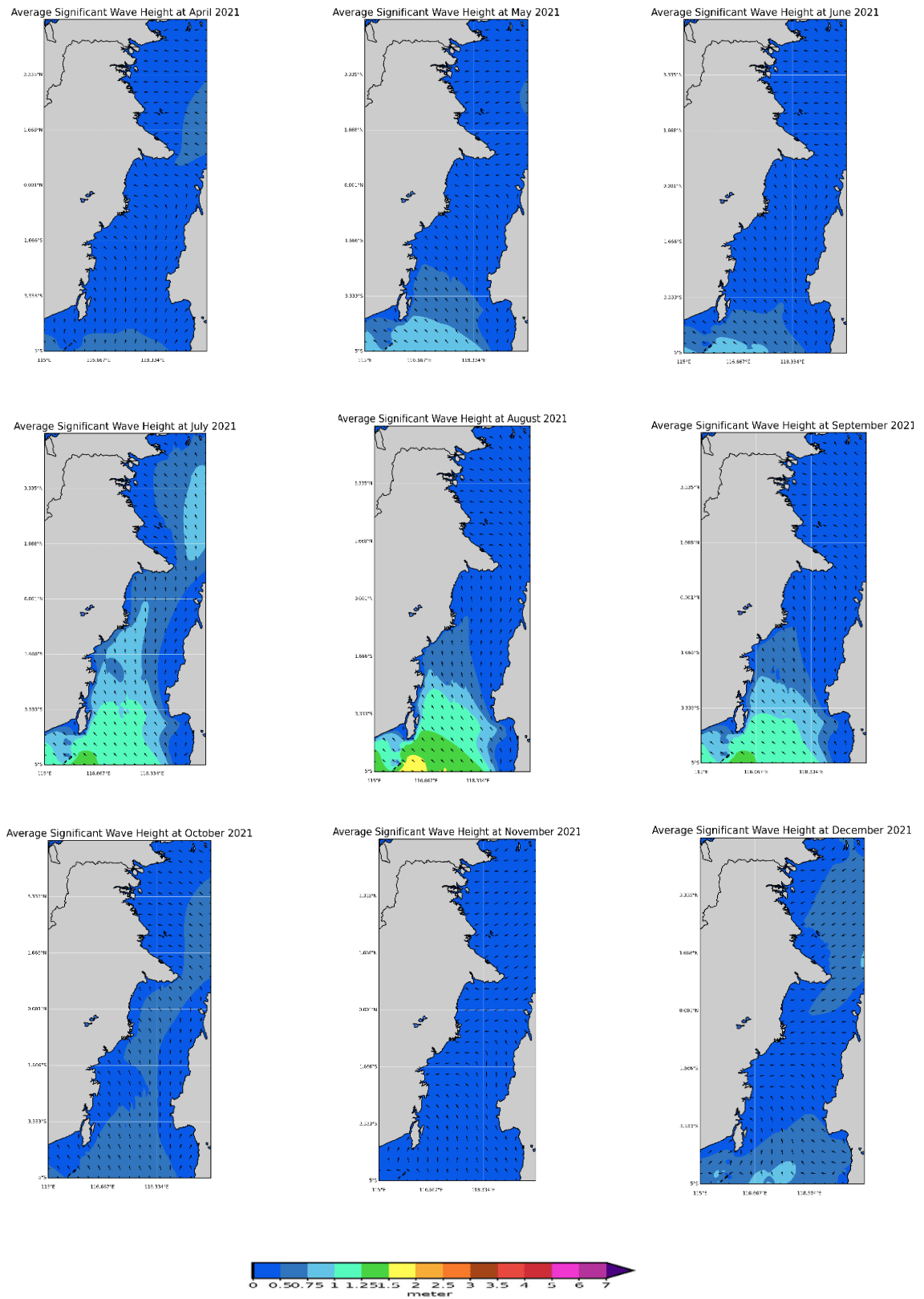


Average Significant Wave Height at February 2021



Average Significant Wave Height at March 2021





Gambar 4.
Peta Spasial Gelombang Signifikan di Wilayah Selat Makassar Tahun 2021

Klasifikasi Gelombang Signifikan:

Tabel 3.
Klasifikasi Gelombang Signifikan

0.1 - 0.5 m	0.5 - 1.25 m	1.25 - 2.5 m	2.5 - 4.0 m	4.0 - 6.0 m	> 6.0 m
Tenang	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem

Berdasarkan peta tinggi gelombang rata-rata pada Desember 2021 hingga Maret 2021, wilayah di Selat Makassar menunjukkan variasi kategori tinggi gelombang. Pada Desember 2021, tinggi gelombang dominan berada pada kategori Rendah (0.5–1.5 m). Pada wilayah tertentu di selatan, gelombang mencapai 1 meter, dimana menunjukkan adanya intensitas aktivitas angin monsun barat laut yang membawa angin kuat di wilayah ini. Pada Januari 2021, pola yang serupa teramati, dengan sebagian besar wilayah masih berada dalam kategori Rendah dan adanya peningkatan tinggi gelombang di wilayah Selatan mencapai 1,25 meter. Bulan Februari 2021 menunjukkan kondisi gelombang yang relatif sama seperti bulan sebelumnya. Secara umum, dengan sebagian besar perairan dalam kategori Tenang hingga Rendah (0.1–1.25 m), kecuali pada wilayah tengah yang masih mencatat gelombang kategori Sedang. Pada Maret 2021, kondisi gelombang semakin menurun, mendekati kategori Tenang hingga Rendah di seluruh wilayah, dengan sedikit area di perairan selatan yang mencatat kategori Sedang. Hal ini menunjukkan dampak dari penurunan intensitas angin monsun barat yang mulai melemah menjelang transisi ke musim pancaroba.

Pada bulan April dan Mei 2021, ketinggian gelombang signifikan di wilayah Selat Makassar sebagian besar berada pada kategori Tenang (0,1–0,5 meter) hingga Rendah (0,5–1,25 meter).

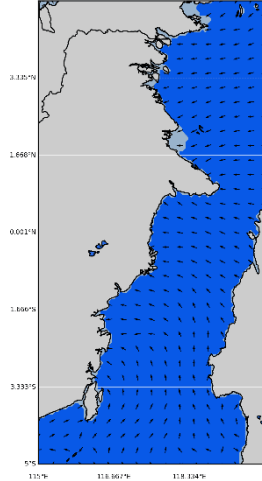
Kondisi ini menunjukkan perairan yang relatif stabil, tanpa adanya gelombang kategori tinggi atau ekstrem. Pada periode Juni hingga September 2021, tinggi gelombang menunjukkan variasi yang signifikan di wilayah perairan ini. Pada bulan Juni, tinggi gelombang didominasi oleh kategori Tenang (0,1–0,5 meter) di sebagian besar wilayah, dengan intensitas gelombang yang sedikit meningkat di bagian selatan. Pada bulan Juli, area dengan gelombang rendah meluas terutama di bagian tengah hingga selatan, sementara gelombang kategori sedang (1,25–2,5 meter) mulai muncul di bagian selatan perairan. Pada bulan Agustus, distribusi gelombang menunjukkan pola yang serupa, dengan dominasi kategori sedang di sebagian besar area selatan, yang disebabkan oleh pengaruh angin monsun timur yang lebih kuat. Selanjutnya, pada bulan September, gelombang kategori tenang tetap mendominasi di bagian selatan, sementara area Selatan cenderung berada pada kategori rendah. Distribusi ini mencerminkan pengaruh perubahan pola angin musiman yang menguatkan dinamika gelombang di wilayah selatan.

Pada bulan Oktober 2021, tinggi gelombang signifikan di perairan cenderung berada pada kategori tenang hingga rendah, dengan sebagian besar wilayah memiliki tinggi gelombang antara 0,5–0,75 meter. Pada bulan November 2021, kondisi gelombang tetap berada dalam kategori yang sama, dengan dominasi tinggi gelombang

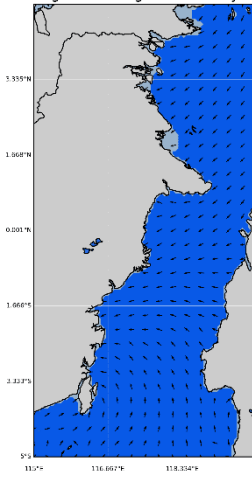
antara 0,5–0,75 meter di sebagian besar perairan. Namun, wilayah bagian tengah dan utara menunjukkan sedikit penurunan tinggi gelombang menuju

kategori tenang ($<0,5$ meter). Perubahan ini menandakan fase transisi musiman yang memengaruhi pola gelombang di wilayah tersebut.

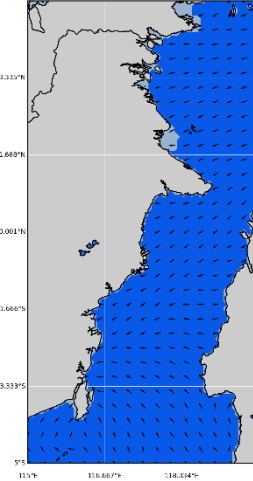
Average Swell Height at January 2021



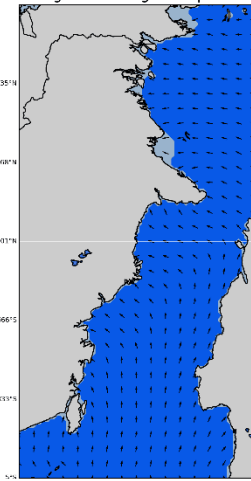
Average Swell Height at February 2021



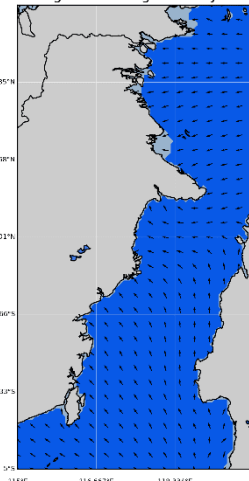
Average Swell Height at March 2021



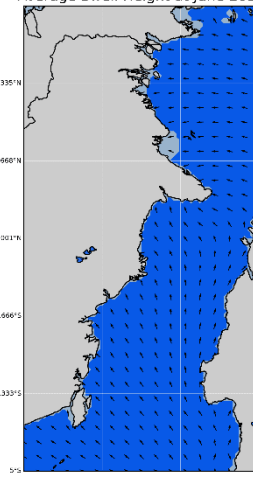
Average Swell Height at April 2021



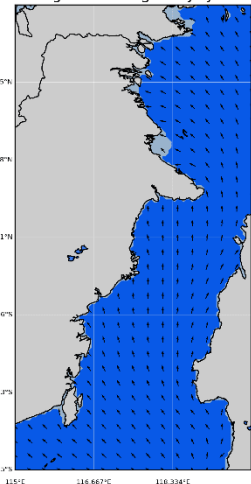
Average Swell Height at May 2021



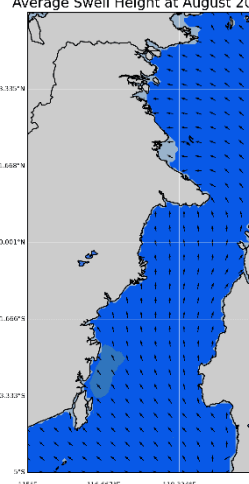
Average Swell Height at June 2021



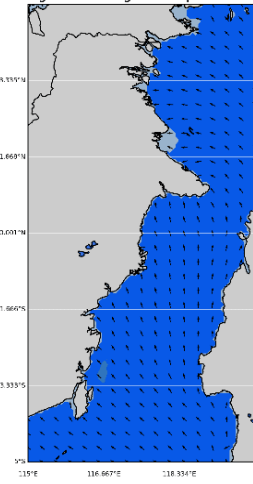
Average Swell Height at July 2021

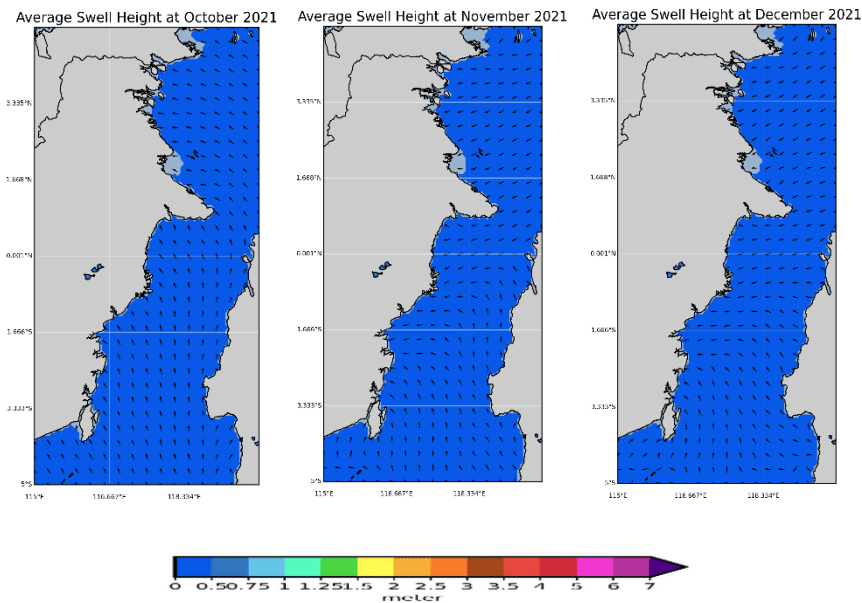


Average Swell Height at August 2021



Average Swell Height at September 2021





Gambar 5.
Peta Spasial Swell di Wilayah Selat Makassar Tahun 2021

Klasifikasi Swell:

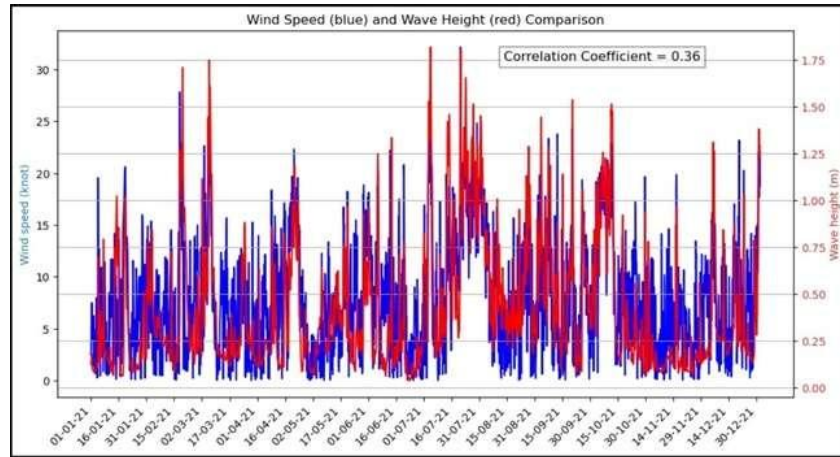
Tabel 4.
Klasifikasi Swell

0.1 - 0.5 m	0.5 - 1.25 m	1.25 - 2.5 m	2.5 - 4.0 m	4.0 - 6.0 m	> 6.0 m
Tenang	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem

Berdasarkan peta rata-rata tinggi swell bulan sepanjang tahun 2021, distribusi tinggi swell di Selat Makassar umumnya didominasi kategori Tenang (0.1-0.5 meter). Kondisi ini menunjukkan swell yang relatif stabil tanpa adanya gangguan signifikan sehingga relatif kondusif untuk aktivitas maritim seperti perikanan atau pelayaran dalam skala kecil hingga menengah selama periode ini. Pada bulan Desember, Januari dan Februari swell di wilayah Utara Selat Makassar dominan berasal dari arah Timur Laut dengan bagian tengah dominan dari arah Timur sedangkan wilayah Selatan dominan berasal dari Barat Daya – Tenggara. Selanjutnya, arah Swell pada

bulan April hingga Mei terdapat perubahan di wilayah selatan yang dominan berasal dari arah Selatan. Kondisi ini menunjukkan adanya peralihan dari monsun barat ke monsun timur. Pada periode Juni hingga September, arah swell dominan dari Selatan hingga Tenggara yang menandakan angin monsun timur telah aktif di wilayah ini. Pada bulan Oktober 2021, arah dominan swell berasal dari Selatan hingga Tenggara sedangkan pada bulan November 2021, arah swell mulai mengalami perubahan dengan wilayah Utara Selat Makassar dominan berasal dari Timur Laut sedangkan wilayah Selatan dominan berasal dari Selatan hingga Barat Daya. Pola ini

mengindikasikan adanya masa transisi menuju monsun barat di wilayah Selat Makassar.



Gambar 6.

Grafik Perbandingan antara Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang

Grafik perbandingan kecepatan angin (biru) dan tinggi gelombang (merah) sepanjang tahun 2021 menunjukkan adanya korelasi positif antara kedua variabel dengan koefisien korelasi sebesar 0,36. Nilai korelasi ini mengindikasikan hubungan yang lemah antara kecepatan angin dan tinggi gelombang di wilayah penelitian. Kenaikan kecepatan angin umumnya diikuti dengan peningkatan tinggi gelombang, yang konsisten dengan teori bahwa angin berkontribusi terhadap pembentukan gelombang melalui transfer energi. Namun, korelasi yang tidak terlalu tinggi menunjukkan adanya pengaruh faktor lain seperti arus laut dan swell dari area yang lebih jauh.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola angin, gelombang signifikan, dan swell di Selat Makassar sepanjang tahun 2021 dipengaruhi secara kuat oleh dinamika sistem monsun, terutama monsun barat laut (Desember–Maret) dan monsun

tenggara (Juni–September). Secara umum, karakteristik atmosfer dan oseanografi di wilayah ini menunjukkan perubahan musiman yang konsisten dengan arah dan intensitas angin muson yang berlaku di kawasan Indonesia bagian tengah.

Pola angin di Selat Makassar menunjukkan perubahan arah dan kecepatan yang mengikuti siklus musiman. Pada periode monsun barat laut (Desember–Maret), angin dominan berhembus dari arah utara hingga timur laut dengan kecepatan lemah hingga sedang (2–15 knot). Kondisi ini menunjukkan adanya suplai massa udara lembap dari Laut Cina Selatan menuju wilayah Indonesia bagian tengah. Intensitas angin yang lebih kuat di wilayah selatan, seperti sekitar pesisir Mamuju, mengindikasikan adanya pengaruh topografi lokal dan efek konvergensi angin di daerah pesisir.

Pada periode transisi (April–Mei), terjadi perubahan arah angin dari selatan hingga tenggara yang menandai berakhirnya monsun barat dan awal

perkembangan monsun timur. Fenomena eddy yang muncul di sekitar Kutai Timur dan Mamuju menunjukkan dinamika atmosfer lokal yang turut memengaruhi pola angin regional.

Selanjutnya, pada periode monsun tenggara (Juni–September), arah angin didominasi dari selatan–tenggara dengan kecepatan 6–15 knot. Pola ini mencerminkan pengaruh angin monsun timur yang berasal dari Australia dan membawa udara kering. Kecepatan angin tertinggi tercatat pada bulan Juli, kemudian melemah pada September seiring dengan fase transisi menuju monsun barat. Hasil ini konsisten dengan penelitian Ikhwan et al. (2019), yang menyebutkan bahwa angin musiman memiliki pengaruh signifikan terhadap perubahan pola arus dan dinamika perairan di Selat Makassar.

Variasi tinggi gelombang signifikan memperlihatkan keterkaitan yang erat dengan pola angin musiman. Pada periode monsun barat laut, tinggi gelombang rata-rata berkisar antara 0,5–1,25 meter (kategori rendah) dengan kecenderungan peningkatan di wilayah selatan. Kondisi ini sejalan dengan intensitas angin yang relatif lebih kuat di wilayah tersebut. Menjelang akhir musim barat (Maret), tinggi gelombang menurun hingga mencapai kategori tenang, menunjukkan melemahnya pengaruh angin monsun barat. Selama periode transisi (April–Mei), kondisi perairan relatif stabil dengan tinggi gelombang berkisar antara 0,1–1,25 meter (kategori tenang–rendah). Namun, saat monsun tenggara aktif (Juni–September), gelombang menunjukkan peningkatan di bagian selatan Selat Makassar dengan ketinggian mencapai 1,25–2,5 meter (kategori sedang). Pola ini sejalan dengan arah dan kekuatan angin dari

selatan yang membawa energi gelombang lebih besar ke wilayah perairan Makassar bagian selatan. Pada periode akhir tahun (Oktober–November), tinggi gelombang kembali menurun seiring dengan melemahnya angin monsun timur dan peralihan ke monsun barat. Temuan ini menunjukkan bahwa variasi gelombang signifikan sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan arah angin dominan musiman. Namun, terdapat pula faktor-faktor lain seperti kondisi arus laut dan topografi dasar laut yang berkontribusi terhadap distribusi spasial tinggi gelombang.

Distribusi tinggi swell di Selat Makassar secara umum berada pada kategori tenang (0,1–0,5 meter), yang menunjukkan kondisi laut yang relatif stabil sepanjang tahun 2021. Arah dominan swell juga mengikuti perubahan musiman. Pada periode monsun barat laut, swell di bagian utara berasal dari arah timur laut, sedangkan di bagian selatan berasal dari barat daya–tenggara. Saat transisi ke monsun timur (April–Mei), arah swell di selatan berubah menjadi dominan dari selatan, menandakan masuknya pengaruh angin muson dari Australia. Selama periode monsun tenggara (Juni–September), arah swell dari selatan hingga tenggara semakin jelas, sejalan dengan peningkatan kekuatan angin musiman. Pada bulan Oktober–November, swell kembali menunjukkan perubahan arah dari selatan ke timur laut di bagian utara, yang menandakan awal transisi menuju monsun barat. Kondisi swell yang relatif tenang sepanjang tahun menunjukkan bahwa Selat Makassar memiliki karakteristik yang lebih dipengaruhi oleh angin lokal dan monsun regional dibandingkan swell jarak jauh (remote swell) dari samudra terbuka.

Analisis korelasi antara kecepatan angin dan tinggi gelombang menghasilkan koefisien korelasi sebesar 0,36, yang menunjukkan hubungan positif namun lemah. Artinya, peningkatan kecepatan angin cenderung diikuti oleh kenaikan tinggi gelombang, tetapi hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier. Hal ini sejalan dengan teori Sardana et al (2024) yang menjelaskan bahwa pembentukan gelombang merupakan hasil transfer energi dari angin ke permukaan laut. Korelasi yang tidak terlalu tinggi menunjukkan adanya pengaruh faktor lain seperti arus laut, swell dari luar perairan Selat Makassar, serta interaksi topografi dasar laut yang turut menentukan karakteristik gelombang di wilayah ini.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pola angin, gelombang signifikan, dan swell di Selat Makassar selama tahun 2021 dipengaruhi secara signifikan oleh dinamika monsun barat laut (Desember–Maret) dan tenggara (Juni–September). Monsun barat laut menghasilkan angin dari utara-timur laut dengan kecepatan lemah hingga sedang (2–15 knot), menciptakan gelombang kategori rendah (0,5–1,25 meter), sementara monsun tenggara menghasilkan angin dari selatan-tenggara dengan kecepatan lebih tinggi, menciptakan gelombang kategori rendah hingga sedang (0,5–2,5 meter). Swell dominan dalam kategori tenang (0,1–0,5 meter) sepanjang tahun, dengan arah yang mencerminkan perubahan pola monsun. Korelasi positif antara kecepatan angin dan tinggi gelombang (koefisien korelasi 0,36) menunjukkan hubungan lemah, mengindikasikan kontribusi faktor lain

seperti arus laut dan swell regional. Penelitian lanjutan dengan resolusi model lebih tinggi dan integrasi data pengamatan diperlukan untuk memahami dinamika oseanografi secara lebih detail, serta mendukung perencanaan aktivitas maritim dan mitigasi risiko di wilayah ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Meteorologi Maritim BMKG, atas dukungan dan penyediaan data yang menjadi dasar analisis dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Universitas Negeri Semarang, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian. Apresiasi mendalam diberikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian studi ini. Dukungan dari berbagai pihak sangat berarti dalam menyelesaikan penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Gao, P., Wang, X., Chen, H., Chen, Y., Hua, Y., & Nie, J. (2025). Transition of Predominant Regional Tectonics to Global Climate Forcing for Asian Summer Monsoons At ~7.2 Ma. *Geomorphology*, 484(109840). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109840>
- Ikhwan, A., Purba, J. H. J., & Pinem, F. (2019). Sea State Analysis Based on Wave Model Hindcasting in the Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 348(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/348/1/012062>

- Islek, F., & Yuksel, Y. (2021). Inter-comparison of Long-Term Wave Power Potential in The Black Sea Based on The SWAN Wave Model Forced with Two Different Wind Fields. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93(November 2020), 101192. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2020.101192>
- Jialei, L., Jian, S., Wenjing, Z., Jingmin, X., & Qianhui, W. (2023). Numerical Simulations on Waves in The Northwest Pacific Ocean Based on SWAN Models Numerical Simulations on Waves in The Northwest Pacific Ocean Based on SWAN Models. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2486/1/012034>
- Latief, R.N. & Adytia, D., (2019). Simulasi Gelombang Laut pada Desain Tanggul Laut menggunakan Model Numerik SWAN di Teluk Jakarta. *e-Proceeding of Engineering*, Universitas Telkom, Bandung, 18 Februari 2019.
- Li, G., Zhang, H., Lyu, T., & Zhang, H. (2024). Regional Significant Wave Height Forecast in the East China Sea based on the Self-Attention ConvLSTM with SWAN model. *Ocean Engineering*, 312(P1), 119064. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119064>
- Napitupulu, G., Nuruddin, M. F., Fekranie, N. A., & Magdalena, I. (2021). Analysis of Wind Generated Wave Characteristics by SWAN model in Balikpapan Bay Analysis of Wind Generated Wave Characteristics by SWAN model in Balikpapan Bay. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012067>
- Pakhirehzan, M., & Malakooti, H., (2024). Investigation The Surface Waves During the Indian Ocean Summer Monsoon in the Chabahar Offshore Area Using Numerical Modeling. *Int. J. Coastal Offshore Environ. Eng.*, 9(1):31-42. <https://www.doi.org/10.22034/ijcoe.2024.418633.1048>
- Sardana, D., Kumar, P., & Rajni. (2024). Influence of Climate Variability Modes Over Wind-Sea and Swell Generated Wave Energy. *Ocean Engineering*, 291(December 2023), 116471. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116471>
- Sugiyono. (2010). Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta
- Umesh, P.A., & Behera, M.R., (2021). On The Improvements in Nearshore Wave Height Predictions Using Nested SWAN-SWASH Modelling in The Eastern Coastal Waters of India. *Ocean Engineering Conference*, Mumbai, 9 Januari 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109550>
- Varikoden, H., George, C., Ancy, P., & Babu, C. A. (2025). A Comprehensive Review on The Recent Changes in Indian Summer Monsoon Rainfall and Its Relations with Global Climate Drivers Based on The CMIP6 Simulations. *Atmospheric Research*, 326(June), 108302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108302>

- Widyani, A.P., Amalya, A., Adiprabowo, S.R., Suwignyo, T., Ismanto, A., & Maslukah, L., (2024). Pengaruh Siklon Tropis Dahlia terhadap Karakteristik Gelombang Laut di Pesisir Selatan Banten Menggunakan Pemodelan SWAN. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(3): 327-340. DOI: 10.14710/buloma.v13i3.58022
- Wu, W. C., Wang, T., Yang, Z., & García-Medina, G. (2020). Development and Validation of A High-Resolution Regional Wave Hindcast Model for U.S. West Coast Wave Resource Characterization. *Renewable Energy*, 152, 736–753. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.077>
- Wurjanto, A., & Mukhti, J. A. (2021). Sensitivity Analysis for Wind-Driven Significant Wave Height Model in SWAN: A Sunda Strait Case. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 729(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012035>