

Pengaruh Siklon Tropis Dahlia Terhadap Karakteristik Gelombang Laut di Pesisir Selatan Banten Menggunakan Pemodelan SWAN

Afidhah Puspita Widyani^{1*}, Afroh Amalya¹, Samuel Radityo Adiprabowo², Tyo Suwignyo²,
Aris Ismanto¹, Lilik Maslukah¹

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

²Pusat Meteorologi Maritim Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta 10720, Indonesia
E-mail: afidhahpw03@gmail.com

Abstrak

Secara umum Indonesia tidak termasuk wilayah yang dilintasi oleh siklon tropis dikarenakan sifat fisik siklon tropis yang selalu menjauh dari ekuator. Namun sejumlah siklon tropis yang terjadi di sekitar wilayah Indonesia memberikan dampak secara tidak langsung di wilayah Indonesia. Samudera Hindia merupakan salah satu wilayah yang memiliki tingkat pertumbuhan siklon tropis paling subur. Salah satu siklon yang pernah terjadi di wilayah tersebut yaitu Siklon Tropis Dahlia. Dampak dari Siklon Tropis Dahlia pada wilayah Indonesia khususnya bagian pesisir selatan Banten yaitu timbulnya angin yang kencang disertai gelombang laut yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh Siklon Tropis Dahlia terhadap karakteristik gelombang laut di pesisir selatan Banten. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pemodelan SWAN (Simulating Wave Near-Shore). Hasil dari pemodelan menunjukkan nilai kecepatan angin tertinggi mencapai 16 m/s dan ketinggian gelombang signifikan mencapai 3.5 m dengan arah propagasi dari barat Sumatera menuju tenggara hingga selatan Jawa. Secara umum, luaran model SWAN dapat menggambarkan tren variabilitas gelombang laut akibat dari adanya pengaruh Siklon Tropis Dahlia.

Kata kunci : Gelombang Laut, Pemodelan Gelombang Laut, Pemodelan SWAN, Siklon Tropis Dahlia

Abstract

The Effect of Tropical Cyclone Dahlia on the Characteristics of Sea Waves on the South Coast of Banten Using SWAN Modeling

Generally, Indonesia is not directly impacted by tropical cyclones due to the physical nature of these cyclones, which tend to move away from the equator. However, several tropical cyclones that occur near Indonesia have indirect effects on the region. The Indian Ocean is one of the most active areas for tropical cyclone development. One such cyclone that affected this area was Tropical Cyclone Dahlia. The impact of Tropical Cyclone Dahlia on Indonesia, particularly along the southern coast of Banten, includes strong winds and high sea waves. This study aims to understand the influence of Tropical Cyclone Dahlia on the characteristics of sea waves along the southern coast of Banten using SWAN (Simulating Wave Near-Shore) modeling. The results show that wind speeds reached up to 16 m/s, and significant wave heights reached 3.5 meters, with wave propagation from the west of Sumatra towards the southeast and south of Java. Overall, the SWAN model outputs effectively capture the trend of sea wave variability due to the influence of Tropical Cyclone Dahlia.

Keywords : Ocean Waves, Ocean Waves Modelling, SWAN Modeling, Tropical Cyclone Dahlia

PENDAHULUAN

Siklon tropis merupakan sistem cuaca dengan tekanan rendah berinti hangat, non-frontal, berskala sinoptik yang terbentuk di perairan hangat

(tropis dan subtropis) pada samudra dan berkembang menjadi pusaran yang besar, terdiri dari angin berputar, awan intens dan hujan deras yang menarik energi dari samudra (Rathore *et al.*,

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v13i3.58022

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 08-09-2024

Disetujui/Accepted : 21-03-2024

2017). Selain bertekanan rendah, siklon tropis dicirikan dengan adanya aktivitas konvektif yang kuat, yaitu pembentukan awan tebal dan curah hujan dengan intensitas tinggi. Siklon tropis dapat terbentuk di daerah dengan suhu permukaan laut hangat yang diketahui berkisar lebih dari 26.5°C dan ketidakstabilan kondisi atmosfer (Sobel *et al.*, 2021). Pusat Siklon Tropis yang terbentuk pada suatu wilayah memiliki mata siklon yang dikelilingi dengan dinding mata, yaitu wilayah yang berbentuk cincin dengan ketebalan mencapai 16 km. Kecepatan angin pada mata siklon umumnya relatif rendah, sedangkan pada dinding mata atau wilayah berbentuk cincin, kecepatan angin yang terjadi relatif tinggi (Tabana *et al.*, 2023). Siklon tropis umumnya mencakup wilayah yang cukup luas, mulai dari beberapa puluhan hingga ratusan kilometer. Siklon tropis dapat terbentuk di wilayah dengan suhu permukaan laut hangat berkisar lebih dari 26.5°C dan ketidakstabilan kondisi atmosfer (Sobel *et al.*, 2021). Pada beberapa negara, siklon tropis memiliki sebutan yang beragam, seperti taifun (*typhon*) untuk wilayah Pasifik, *willy-willy* untuk sebutan orang Australia, *hurricane* untuk sebutan orang Amerika, dan *baguio* untuk sebutan orang Filipina (Handoko, 2017).

Secara umum, siklon tropis dapat terbentuk di wilayah pusat tekanan rendah di antara lintang 23.5° LU/LS, dan dapat meluas hingga 30° LU/LS (Handoko, 2017). Namun sekitar 65% siklon tropis banyak terbentuk di wilayah dengan lintang antara 10° hingga 20° dari ekuator (Kawuwung *et al.*, 2019) dan hanya sekitar 13% siklon tropis yang terbentuk di wilayah dengan lintang diatas 20° LS/LU, sedangkan di wilayah dengan lintang rendah 0° - 10° LS/LU siklon tropis jarang terbentuk (Syaifullah, 2015).

Berdasarkan letak Indonesia yang berada di wilayah ekuator pada 94° BT – 141° BT dan 6° LU - 11° LS, Indonesia tidak termasuk wilayah yang dilintasi oleh siklon tropis dikarenakan sifat fisik siklon tropis yang selalu menjauh dari ekuator. Namun sejumlah siklon tropis yang terjadi di sekitar wilayah Indonesia memberikan dampak secara tidak langsung di wilayah Indonesia (BMKG, 2015). Radius dari Siklon Tropis yang cukup dekat dengan suatu wilayah, mengakibatkan terjadinya peningkatan curah hujan (Fitri *et al.*, 2022). Curah hujan yang tinggi ini juga disertai dengan angin kencang, sehingga dapat membahayakan bagi pelayaran kapal maupun wilayah pesisir. Wilayah yang memiliki tingkat

pertumbuhan siklon tropis paling subur terdapat di Samudra Hindia dan perairan barat Australia (Suhardi *et al.*, 2020). Siklon tropis yang terbentuk pada wilayah Samudra Hindia umumnya memiliki kekuatan yang sangat besar, sehingga efeknya masih dapat dirasakan di sejumlah wilayah Indonesia meskipun letaknya yang cukup jauh (Suryanto dan Luthfian, 2016).

Siklon Tropis Dahlia merupakan salah satu siklon tropis yang pernah terjadi di Samudra Hindia dan memberikan efek terhadap sejumlah wilayah Indonesia. Siklon Tropis Dahlia terbentuk pasca Siklon Tropis Cempaka terjadi, yaitu mulai sejak tanggal 29 November – 2 Desember 2017 (Fibriantika dan Alhaqq, 2018). Siklon Tropis Dahlia memberikan dampak buruk bagi sejumlah wilayah di Indonesia, khususnya pada wilayah selatan Pulau Jawa.

Dampak perubahan kondisi alam ini berupa hujan sedang hingga lebat, angin kencang > 20 knots, hingga kenaikan tinggi gelombang laut (Windupranata *et al.*, 2018). Hal tersebut dapat mengakibatkan terjadinya bencana banjir, longsor, pohon tumbang, kerusakan infrastruktur hingga korban meninggal dan hilang. Terlebih lagi masyarakat yang tinggal di pesisir dan berprofesi sebagai nelayan turut merasakan dampak dari Siklon Tropis Dahlia yang menyebabkan angin kencang dan kenaikan tinggi gelombang di sejumlah wilayah, sehingga membahayakan bagi pelayaran kapal maupun aktivitas wilayah pesisir (Windupranata *et al.*, 2018).

Gelombang laut merupakan pergerakan naik dan turunnya muka air laut dengan arah tegak lurus permukaan laut dan membentuk kurva atau grafik sinusoidal. Gelombang dapat terbentuk akibat dari beberapa faktor seperti angin, gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari membentuk gelombang pasang surut, aktivitas tektonik dan vulkanik membentuk gelombang tsunami, serta aktivitas kapal yang bergerak (Triatmodjo, 2016). Gelombang laut yang dibangkitkan oleh angin dimulai dengan terjadinya perpindahan tenaga angin ke permukaan perairan sehingga menyebabkan terbentuknya riak-riak air, alunan/bukit, lalu berubah menjadi suatu gelombang (Mahsunah *et al.*, 2019). Dalam memperkirakan gelombang secara visual, beberapa pengamat maupun peneliti cenderung melihat pada gelombang tertinggi di medan gelombang.

Gelombang laut yang memiliki sejumlah peran dalam mempengaruhi aktivitas manusia adalah gelombang laut signifikan (Supriyadi,

2019). Tinggi gelombang signifikan merupakan salah satu karakteristik utama gelombang laut dan sebagai parameter utama untuk memahami dan memodelkan gelombang laut. Tinggi rata-rata dan periode dari 15 hingga 20 gelombang yang lebih tinggi dari beberapa kelompok gelombang disebut dengan tinggi gelombang signifikan dan periode signifikan (Holthuijsen, 2007). Secara lebih mudah, tinggi gelombang laut signifikan merupakan tinggi sepertiga dari tinggi gelombang maksimum (WMO, 2018).

Aktivitas gelombang laut tinggi yang disebabkan oleh siklon tropis, cukup membahayakan di sejumlah wilayah yang terdampak. Terlebih lagi, apabila wilayah tersebut merupakan jalur pelayaran dan dekat dengan pemukiman pesisir. Adanya Siklon Tropis Dahlia yang menyebabkan dampak di sejumlah wilayah, memerlukan suatu studi mengenai pengaruh Siklon Tropis Dahlia terhadap karakteristik tinggi gelombang di pesisir selatan Banten. Untuk mengetahui karakteristik tinggi gelombang laut akibat Siklon Tropis Dahlia, dapat menggunakan suatu pemodelan numerik.

Pemodelan gelombang laut dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan suatu model generasi ketiga yang dikembangkan oleh Delft University of Technology, yaitu SWAN (*Simulating Wave Near-Shore*) yang dapat diakses secara gratis melalui situs <http://www.swan.tudelft.nl>. Model SWAN merupakan model hidrodinamika yang didesain khusus untuk menganalisis terjadinya pembentukan gelombang dengan cara menyelesaikan persamaan keseimbangan spektral (The SWAN Team, 2023).

Model SWAN telah banyak digunakan di seluruh dunia oleh para peneliti dalam berbagai studi gelombang pesisir dikarenakan kemudahan penggunaannya dan skema numerik yang sangat stabil (Akpınar *et al.*, 2012). Oleh karena itu SWAN menjadi pilihan yang tepat dalam melakukan suatu pemodelan gelombang laut. Adanya informasi mengenai gelombang laut dapat membantu dalam beberapa aspek kehidupan, khususnya bagi oseanografi. Begitu pula dengan informasi mengenai karakteristik angin dan gelombang laut saat terjadi siklon tropis dan pengaruhnya pada sejumlah wilayah Indonesia seperti pesisir Selatan Banten.

Pemodelan gelombang laut perlu dilakukan dalam memetakan karakteristik perambatan gelombang secara spasial yang sukar dicapai

dengan pengukuran gelombang secara langsung pada area yang luas. Salah satu karakteristik gelombang yang dapat dilihat yaitu arah dan tinggi gelombang laut signifikan. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi pemodelan numerik sederhana dalam memprediksi tinggi gelombang signifikan saat Siklon Tropis Dahlia menggunakan *software* SWAN. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi untuk perencanaan mitigasi bencana dari siklon tropis yang akan terjadi di masa mendatang, seperti melakukan evaluasi dini ataupun pembangunan infrastruktur.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini mengkaji mengenai bagaimana pengaruh Siklon Tropis Dahlia terhadap karakteristik kecepatan angin dan gelombang laut yang terbentuk di perairan Samudra Hindia, barat daya Lampung hingga selatan Jawa Tengah pada 25 November hingga 06 Desember 2017. Kajian penelitian terdahulu juga dilakukan yang bertujuan sebagai bahan perbandingan serta acuan dalam melakukan penelitian selanjutnya. Sejumlah kajian penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 1.

Penelitian ini dibatasi dengan domain model dan area penelitian yang mencakup wilayah perairan Selatan Banten. Lintasan dari Siklon Tropis Dahlia di perairan Samudra Hindia barat daya Lampung – selatan Jawa Tengah diperoleh berdasarkan data TCWC BMKG (Gambar 1). Siklon Tropis Dahlia terjadi pada wilayah Samudra Hindia yang berawal dari sekitar perairan barat Sumatera hingga perairan selatan Jawa. Data lintasan dan waktu terjadinya Siklon Tropis Dahlia dapat digunakan sebagai acuan untuk membuat area domain model. Data *input* yang digunakan terdiri dari data batimetri dan angin. Adapun kebutuhan jenis-jenis data yang diperlukan tersaji pada Tabel 2.

Data batimetri diperoleh dari BATNAS (Batimetri Nasional). Data tersebut diunduh dan dilakukan pengolahan menggunakan bahasa pemrograman sehingga didapatkan data dengan format (.bot), menyesuaikan format input data pada SWAN. Data batimetri dari BATNAS ini digunakan sebagai data untuk memperhitungkan kedalaman laut dalam rekonstruksi gelombang. Data yang digunakan selanjutnya yaitu data angin yang diperoleh dari GFS (*Global Forecast System*) yang diperoleh melalui arsip data BMKG dan terdapat dalam bentuk netcdf atau format .nc.

Tabel 1. Kajian penelitian terkait mengenai siklon tropis dan pemodelan gelombang laut SWAN

Lokasi Penelitian	Parameter Kajian	Pendekatan Masalah	Data Penelitian	Referensi
Badai George dan Jacob (2007) di Laut Selatan Jawa hingga Nusa Tenggara	Tinggi gelombang laut signifikan (Hs)	Menggunakan metode simulasi model numerik SWAN pada <i>software</i> Delft3D Wave	<i>Input data:</i> Data angin dan tekanan udara (ERA5), batimetri (GEBCO), elevasi muka air laut (tpxo 7.2) <i>Verifikasi:</i> Data satelit altimetri	(Liufandy <i>et al.</i> , 2022)
Siklon tropis Gonu, Phet dan Ashobaa di Perairan Arabian	Gelombang laut	Menggunakan metode simulasi model numerik sistem WRF untuk cuaca dan SWAN untuk gelombang laut	<i>Input data:</i> Garis pantai (GSHHG), batimetri (ETOPO), admiralty, peta laut dan hidrografi (PMO Iran) <i>Verifikasi:</i> Data tinggi gelombang laut (observasi lapangan)	(Soltanpour <i>et al.</i> , 2021)
Siklon Tropis Cempaka dan Dalia di Jawa Barat	Cuaca ekstrem	Menggunakan metode observasi dan analisis spasial dengan ArcGIS dan WRPlot	Data siklon, curah hujan, angin, gelombang laut dan perubahan suhu (BMKG)	(Suhardi <i>et al.</i> , 2020)
Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia di Perairan Lombok	Gelombang laut	Menggunakan metode simulasi model numerik SWAN versi 41.20	Data batimetri (GEBCO), angin (ECMWF) <i>Verifikasi:</i> Data tinggi gelombang laut signifikan (Altimetri)	(Winduprana <i>ta et al.</i> , 2019)
Siklon Tropis Bakung, Cempaka dan Dahlia di pesisir selatan Jawa	Kondisi cuaca ekstrem dan tinggi gelombang laut	Menggunakan pengamatan dan analisis dengan pemetaan	Data informasi siklon, data angin dan data gelombang laut (BMKG)	(Mahsunah <i>et al.</i> , 2019)
Laut Natuna	Tinggi gelombang laut	Menggunakan metode simulasi model numerik SWAN	<i>Input data:</i> Data batimetri (GEBCO), data angin (ECMWF) <i>Verifikasi:</i> Data gelombang laut signifikan (SEAFINE dan ERA-Interim)	(Muliati <i>et al.</i> , 2019)
Perairan Selatan Jawa	Tinggi gelombang laut	Menggunakan metode simulasi model numerik SWAN	Data angin (ECMWF), data batimetri (GEBCO)	(Rafiuddin <i>et al.</i> , 2018)
Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia di Perairan Lampung hingga Bali	Gelombang laut	Menggunakan metode simulasi model numerik SWAN versi 41.20	Data batimetri (GEBCO), angin (NCEP) <i>Verifikasi:</i> Data tinggi gelombang laut signifikan (Altimetri)	(Winduprana <i>ta et al.</i> , 2018)

Saat ini terdapat sejumlah metode pemodelan atmosfer yang tersedia, misalnya seperti GFS, CMC, NOGAPS, ECMWF, dan lain sebagainya. Masing-masing pemodelan tersebut

memiliki perbedaan jarak antartitik prediksi hingga perhitungan. Dalam kawasan khatulistiwa, data model yang dapat digunakan dan memiliki ketepatan prediksi selama ± 5 hari kedepan, adalah

GFS (Suryanto dan Luthfian, 2016). Data angin ini digunakan sebagai gaya pembangkit utama untuk rekonstruksi gelombang.

Data angin ini kemudian dilakukan pengolahan menggunakan bahasa pemrograman untuk mendapatkan data dengan format .wnd, menyesuaikan format *input* data pada SWAN. Rentang waktu yang digunakan dalam komputasi yaitu pada tanggal 25 November 2017 hingga 6 Desember 2017, dimana saat Siklon Dahlia mulai terbentuk, mencapai puncaknya hingga punah.

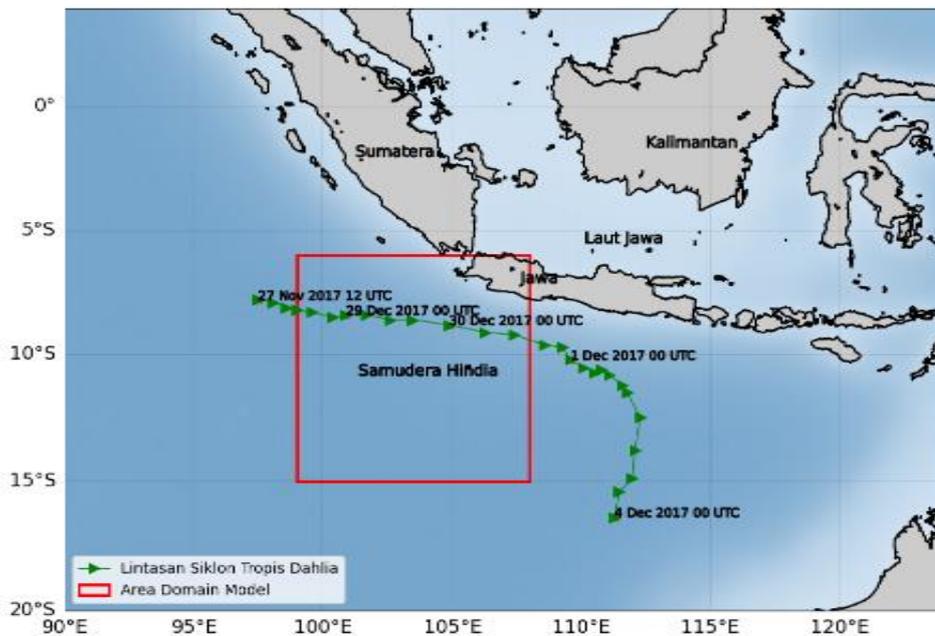
Dalam pendekatan analisisnya, SWAN menggunakan pendekatan spektral yang memungkinkan untuk memperhitungkan interaksi kompleks antara gelombang dengan berbagai faktor lingkungan seperti topografi dasar laut, perubahan kedalaman dan arah angin, sehingga hasilnya lebih akurat. SWAN memiliki kemampuan dalam mengestimasi gelombang acak dan pendek yang dihasilkan oleh angin. Persamaan pembangkit (*governing equation*) yang digunakan dalam SWAN didasarkan pada persamaan kesetimbangan aksi:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_s N)}{\partial s} + \frac{\partial(C_u N)}{\partial u} = S_{tot} \quad (1)$$

Dimana x , y , s dan u merupakan kecepatan propagasi energi gelombang dalam ruang spasial dan spektral. S_{tot} sendiri didefinisikan dalam istilah *sources* dan *sinks* sebagai berikut:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{n13} + S_{n14} + S_{ds,w} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2)$$

Pembuatan script untuk *running* model pada SWAN, dapat mengacu pada ketentuan-ketentuan yang telah ada di dalam modul SWAN atau dapat menggunakan SWAN User Manual sebagai panduan (The SWAN Team, 2023). Dalam penelitian ini, area penelitian difokuskan pada perairan selatan Banten untuk melihat pengaruh dari Siklon Tropis Dahlia. Namun area domain model dibuat mencakup batas-batas berikut 6°-15° S dan 99°-108° E. Pemodelan dilakukan pada tanggal 25 November 2017 hingga 6 Desember 2017. Ukuran grid untuk domain model sepanjang 9° x 9°, dengan jumlah grid 8999 arah x dan 5999 arah y dalam bentuk grid cartesian. Domain pemodelan untuk daratan diberi nilai -999 agar tidak masuk ke dalam pemodelan komputasi. Kondisi awal di seluruh titik memiliki kecepatan angin nol, sehingga dimulai dengan kondisi gelombang yang tenang. *Software* SWAN yang digunakan dalam penelitian ini yaitu versi 41.45.



Gambar 1. Peta lintasan Siklon Tropis Dahlia dan area domain model

SWAN versi 41.45 merupakan versi terbaru yang dirilis pada tanggal 16 Oktober 2023, dimana versi ini memiliki beberapa perubahan dan perbaikan *bug* dari versi sebelumnya, seperti memperbaiki ketidakteraturan dalam pemrosesan pasca untuk *run* paralel (The SWAN Team, 2023).

Proses *running* pada aplikasi SWAN dapat dilakukan dengan memindahkan lokasi *command* dan menuliskan perintah *swanrun*. Proses *running* SWAN yang telah berhasil akan menghasilkan *output* dan kemudian dilakukan *plotting* menggunakan bahasa pemrograman. Proses *plotting* ini dilakukan dengan memplot data dari tanggal 25 November 2017 hingga 6 Desember 2017 meliputi tinggi gelombang signifikan, arah dan kecepatan angin meliputi *uwnd* dan *vwnd* dalam sumbu x dan y. Alur penelitian secara rinci tersaji pada Gambar 2.

Metode verifikasi dari pemodelan SWAN dapat dilakukan dengan menghitung korelasi dan nilai RMSE dari hasil pemodelan dengan data yang berasal dari Marine Copernicus. Data ini digunakan sebagai data yang bersifat observasi untuk memverifikasi hasil model rekonstruksi gelombang. Nilai dari koefisien korelasi dapat bernilai positif (menunjukkan hubungan variabel selaras) ataupun negatif (menunjukkan hubungan

variabel yang berlawanan) (Eq. 3). RMSE (*Root Mean Square Error*) merupakan besar simpangan dari residu dua seri data. Rumus RMSE biasa digunakan untuk verifikasi suatu pemodelan atau prediksi gelombang laut (Eq. 4). Semakin kecil nilai RMSE (mendekati 0), maka hasil akan semakin akurat (Saputra *et al.*, 2015). Semakin kecil nilai RMSE maka hubungan data hasil simulasi tinggi gelombang terhadap data pembandingan semakin akurat (Adyanti *et al.*, 2018).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (I_u - I'_u)(I_p - I'_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_u - I'_u)^2 \sum_{i=1}^n (I_p - I'_p)^2}} \quad (3)$$

Keterangan: I_u = Data pengamatan; I'_u = Rata-rata data pengamatan; I_p = Data hasil prediksi; I'_p = Rata-rata data hasil prediksi; n = Jumlah data

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (I_u - I_p)^2}{n}} \quad (4)$$

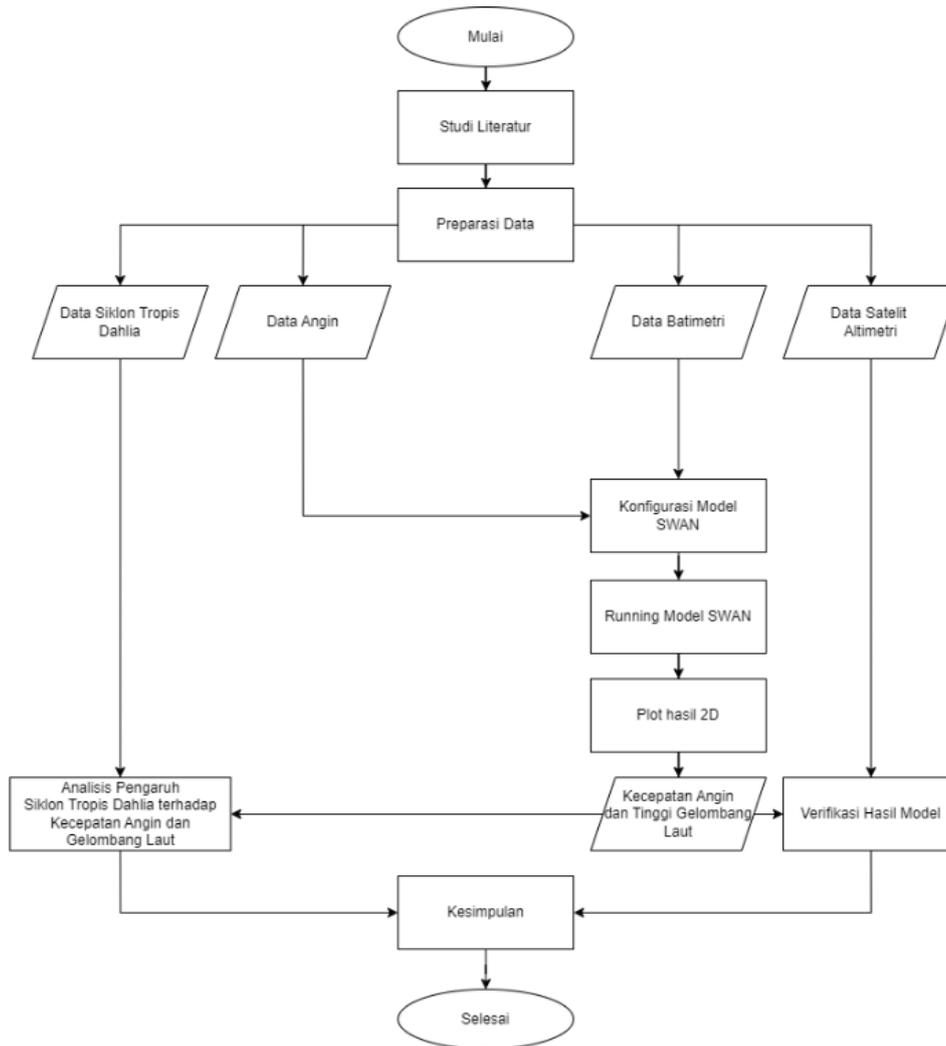
Keterangan: I_u = Data pengamatan; I_p = Data hasil prediksi; n = Jumlah data

Tabel 2. Tipe data beserta sumber data

Data	Keterangan	Sumber
Data Siklon Tropis Dahlia	Lintasan Siklon Tropis Dahlia	BMKG
Data batimetri	Resolusi: 6arc-second (185 × 185 m) Wilayah: 6°-15° S dan 99°-108° E (Perairan Lampung – Lombok dan Samudera Hindia)	BATNAS
Data angin	Resolusi: 0.25° × 0.25° / 27 km × 27 km Wilayah: 6°-15° S dan 99°-108° E (Perairan Lampung – Lombok dan Samudera Hindia) Interval: 3 jam Waktu: 25 November – 06 Desember 2017	GFS
Data Satelit Altimetri Jason-3	Resolusi: 7 km × 7 km Wilayah: 6°-15° S dan 99°-108° E (Perairan Lampung – Lombok dan Samudera Hindia) Waktu: 25 November – 06 Desember 2017	CMEMS

Tabel 3. Kriteria koefisien korelasi (Aswad *et al.*, 2021)

R	Interpretasi
0.90 – 1	Sangat Tinggi
0.70 – 0.89	Tinggi
0.50 – 0.69	Menengah
0.30 – 0.49	Rendah
0.00 – 0.29	Sangat Rendah



Gambar 2. Alur penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi Model SWAN Terhadap Satelit Altimetri

Hasil dari prediksi model perlu dilakukan verifikasi dengan hasil pengamatan aktual untuk mengetahui keakuratan simulasi (Siahsarani *et al.*, 2020). Verifikasi dilakukan menggunakan koefisien korelasi (R) dan *root mean square error* (RMSE) yang disajikan berupa bentuk *scatter plot* dan grafik (Gambar 3). Luaran pemodelan gelombang rekonstruksi dari model SWAN dilakukan verifikasi dengan melakukan perbandingan tinggi gelombang signifikan dengan data citra satelit altimetri Jason-3 pada setiap lintasan satelit. Dengan mempertimbangkan ketersediaan data satelit altimetri, maka verifikasi dilakukan terhadap data-data pada waktu data

satelit altimetri tersedia. Berdasarkan hasil perhitungan *scatter plot* (Gambar 3(a)), korelasi yang dihasilkan memiliki nilai sebesar 0.898 dengan mendekati garis lurus. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan linear dan sangat kuat antara luaran pemodelan SWAN dengan data pengamatan citra satelit altimetri.

Berdasarkan hasil perbandingan antara luaran model SWAN dengan satelit altimetri (Gambar 3(b)), menunjukkan tren yang terjadi di lapangan. Nilai RMSE yang dihasilkan sebesar 1.014 m dengan nilai tinggi gelombang signifikan di bawah tinggi gelombang signifikan satelit altimetri, namun memiliki tren pola yang sama. Nilai RMSE yang rendah atau semakin mendekati angka nol menunjukkan bahwa hasil pemodelan memiliki kualitas data yang semakin baik (Yuliani dan Rejeki, 2020). Berdasarkan penelitian

sebelumnya, diperoleh tinggi gelombang signifikan dari pemodelan SWAN dengan nilai di bawah tinggi gelombang signifikan dari pengukuran satelit altimetri (Windupranata *et al.*, 2019; Windupranata *et al.*, 2018). Penyebab nilai RMSE yang cukup tinggi dari data luaran SWAN tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, seperti parameter *setting* model, luas wilayah model yang terlalu besar sehingga diperlukan metode *nesting*, resolusi data dan adanya kesalahan pengukuran dari satelit altimetri.

Hal ini juga diperkuat oleh penelitian sebelumnya yang membuktikan bahwa hasil model yang tidak menggunakan *boundary condition* atau kondisi batas, rawan akan terjadinya *under estimate* sehingga mempengaruhi hasil perhitungan tinggi gelombang signifikan dibandingkan dengan model yang menggunakan *boundary condition* (Samiksha *et al.*, 2021). Sementara itu penelitian yang dilakukan oleh Atan *et al.*, (2017), menyebutkan bahwa kinerja SWAN cukup sensitif terhadap jenis dan parameterisasi pembangkitan gelombang dan gesekan dasar, sehingga perlu dilakukan sejumlah pengujian sensitivitas.

Verifikasi antara data luaran model SWAN dengan data pengamatan satelit altimetri Jason-3 merupakan langkah penting untuk mengukur keakuratan simulasi model numerik. Namun, data satelit altimetri sendiri memiliki keterbatasan, terlebih lagi saat melakukan pengukuran selama cuaca ekstrim. Terdapat empat faktor yang dapat mempengaruhi kesalahan data satelit altimetri, yaitu kesalahan yang berasal dari sensor, kesalahan propagasi sinyal, kesalahan pada satelit serta dinamika laut (Hutabarat dan Darmawan, 2018).

Secara umum, akurasi pengukuran satelit altimetri Jason-3 lebih baik dibandingkan Sentinel-3A/3B pada tinggi gelombang signifikan rendah. Meskipun demikian, terdapat keterbatasan dalam akurasi pengukuran satelit altimetri Jason-3, terutama pada saat kondisi gelombang pada ketinggian ≥ 4 m. Menurut penelitian Yang *et al.*, (2020), ketika tinggi gelombang signifikan melebihi 4 m, maka akurasi pengukuran Jason-3 cenderung menurun. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang lebih besar yang dihasilkan oleh Siklon Tropis Dahlia menimbulkan lebih banyak potensi kesalahan atau *error*.

Dalam penelitian pemodelan gelombang, disarankan juga untuk melakukan verifikasi tambahan menggunakan data observasi lapangan seperti data *buoy* sehingga dapat meningkatkan

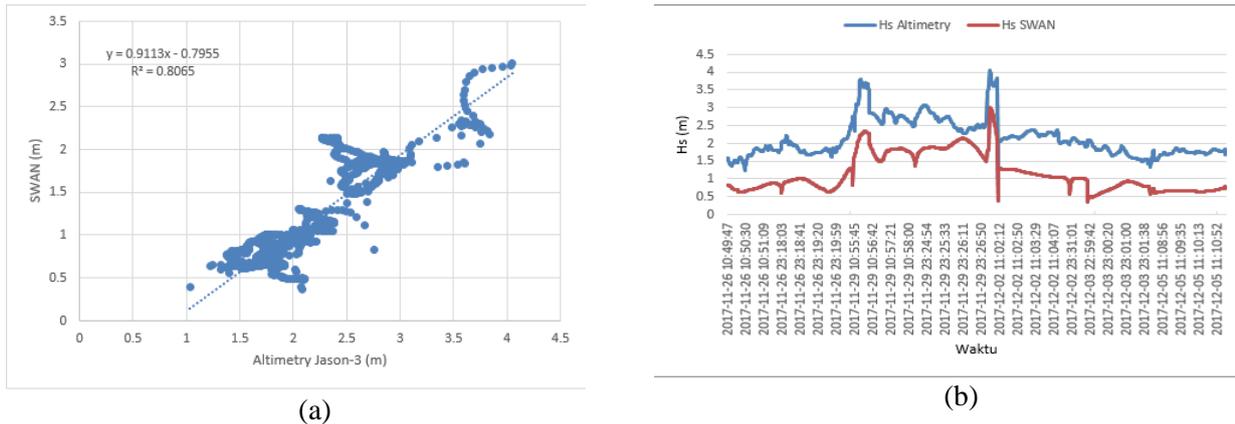
akurasi dari hasil model (Kurniawan *et al.*, 2013). Meskipun nilai RMSE yang diperoleh pada penelitian ini tidak terlalu rendah, nilai korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa luaran model SWAN yang dihasilkan sudah cukup mampu menangkap tren umum variabilitas tinggi gelombang yang disebabkan oleh Siklon Tropis Dahlia.

Pemodelan SWAN saat Siklon Tropis Dahlia di Area Penelitian

Pemodelan dari suatu gelombang laut menggunakan SWAN menghasilkan tinggi gelombang signifikan (H_s) beserta arah serta kecepatan dan arah angin. Tinggi dari gelombang signifikan divisualisasikan dalam bentuk spektrum warna, dengan arah penalaran gelombang yang divisualisasikan dengan vektor. Begitupula dengan hasil pada nilai dan arah angin yang divisualisasikan dalam bentuk spektrum warna dan vektor.

Berdasarkan hasil dari pemodelan SWAN, kecepatan angin dan tinggi gelombang signifikan pada saat sebelum terjadi siklon (25 – 28 November 2017) menunjukkan pola yang sama dan tersaji pada Gambar 4. Kecepatan angin yang terjadi sebesar 0 – 8 m/s dan bergerak dari arah tenggara menuju barat laut. Namun pada tanggal 28 November 2017, terlihat kecepatan angin mulai meningkat di bagian barat perairan Lampung. Hal ini menunjukkan bahwa Siklon Tropis Dahlia sudah mulai terbentuk dan mulai bergerak. Sedangkan tinggi gelombang signifikan belum menunjukkan adanya nilai ketinggian yang signifikan. Gelombang terlihat berpropagasi dari arah tenggara menuju barat laut. Pada tanggal 28 November 2017 mulai terlihat adanya peningkatan ketinggian hingga gelombang signifikan mencapai ± 1.5 m dan berpropagasi searah dengan arah angin.

Pada saat siklon tropis terjadi (29 November - 2 Desember 2017) yang tersaji pada Gambar 5, kecepatan angin mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai puncaknya dengan kecepatan angin berkisar 0 – 16 m/s dan angin mengarah ke pusat siklon yang bergerak sesuai arah jarum jam. Peningkatan kecepatan angin yang tinggi merupakan salah satu ciri terjadinya siklon tropis. Hal ini juga terlihat adanya peningkatan ketinggian yang semakin tinggi hingga gelombang signifikan mencapai 3 – 3.5 m. Pergerakan siklon tropis terlihat bergerak dari barat perairan Lampung menuju perairan selatan Jawa. Pada hasil



Gambar 3. Verifikasi hasil model dengan data satelit altimetri Jason-3 menggunakan (a) korelasi dengan scatter plot; (b) RMSE dengan grafik

visualisasi model, terlihat terdapat dua pusaran angin yang terjadi. Pusaran tersebut salah satunya diduga adalah Siklon Tropis Cempaka. Siklon Tropis Cempaka muncul pada selatan Jawa Tengah pada tanggal 27 November 2017 dengan pergerakan cenderung menuju ke arah timur dan punah pada tanggal 30 November 2017. Pada saat Siklon Tropis Cempaka masih terjadi, muncul Siklon Tropis Dahlia pada tanggal di bagian Sumatera bagian barat dengan pergerakan menuju ke arah tenggara atau perairan pesisir selatan Banten. Siklon Tropis Dahlia muncul pada tanggal 29 November 2017 dan mulai punah pada tanggal 2 Desember 2017 (Perdana *et al.*, 2020). Sehingga pada tanggal 29 November 2017 terlihat jelas terdapat dua pusaran angin yang terjadi.

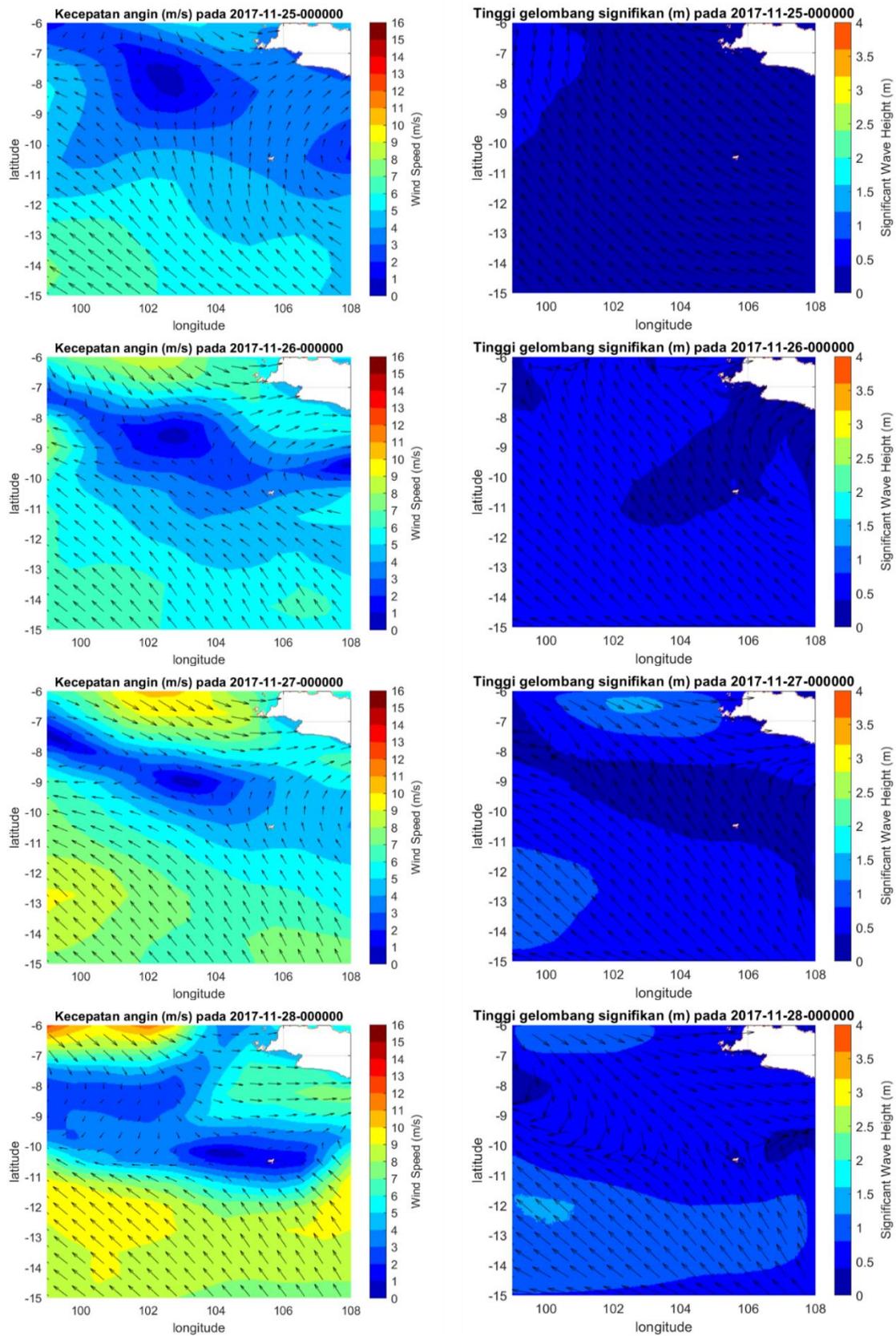
Pada tanggal 2 – 4 Desember 2017, Siklon Tropis Dahlia terus bergerak menuju selatan Jawa hingga mulai menghilang (Gambar 6). Kecepatan angin mengalami penurunan seiring waktu dengan kecepatan berkisar 0 – 9 m/s. Demikian pula dengan tinggi gelombang signifikan yang mulai menurun seiring waktu seperti sedia kala yaitu mencapai ketinggian ± 0.3 - 1 m dan tidak lagi mengalami fluktuasi. Hal ini dikarenakan lintasan Siklon Tropis Dahlia yang sudah bergerak menuju arah tenggara hingga selatan, sehingga berada di luar dari area penelitian. Secara umum, Siklon Tropis yang terjadi pada Samudera Hindia akan bergerak menuju arah Australia (apabila terbentuk di selatan Jawa) dan menuju arah Afrika (apabila terbentuk di selatan Sumatera) (Wiwit dan Luthfian, 2016).

Ketinggian gelombang signifikan tertinggi berada pada tanggal 30 November pukul 10.00 mencapai ketinggian ± 3.5 m. Pada waktu ini,

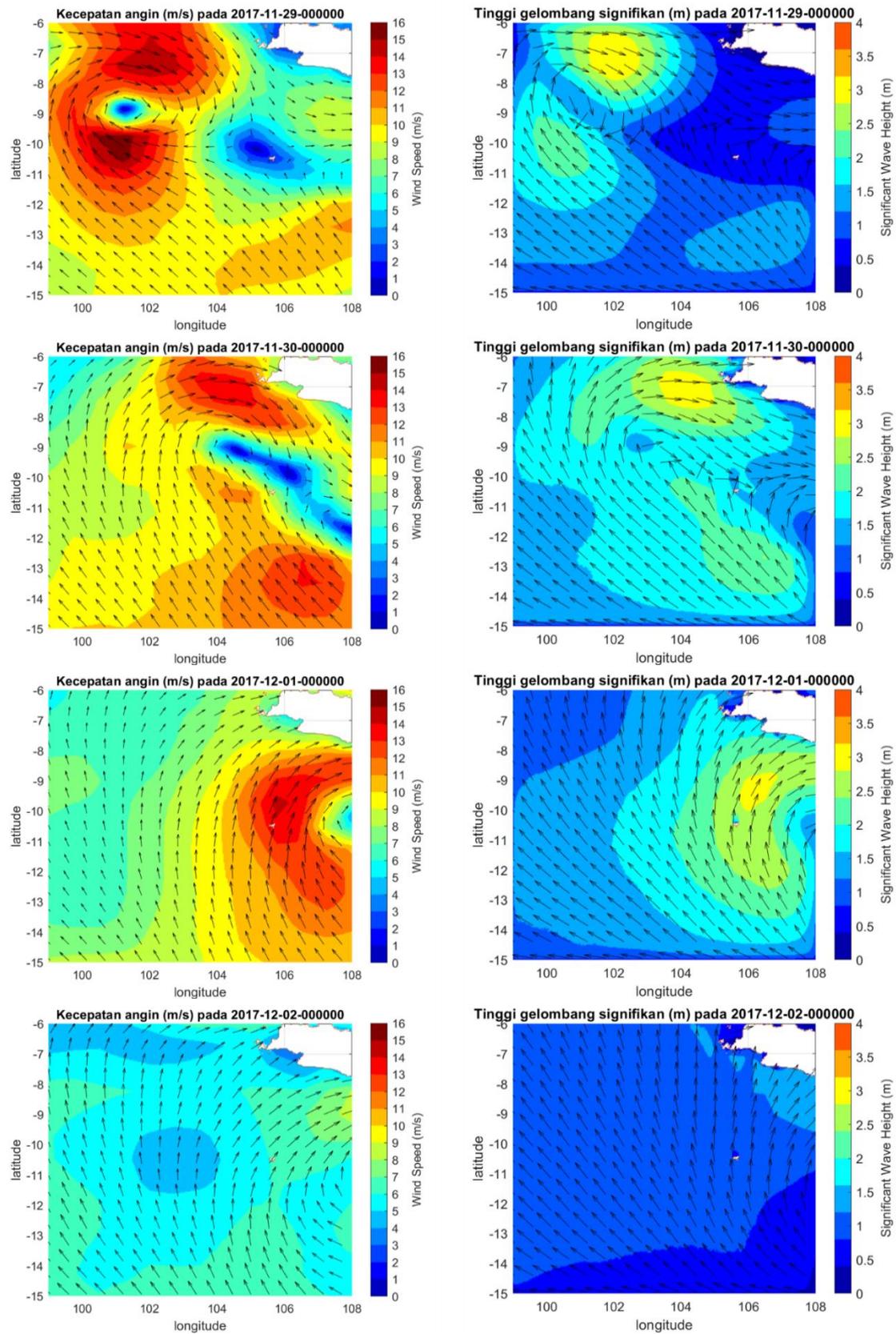
pusaran dan lintasan dari Siklon Tropis Dahlia juga terlihat semakin jelas, yaitu semakin bergerak menuju arah tenggara hingga selatan dengan kecepatan angin yang semakin menurun. Hal ini dikarenakan Siklon Tropis Dahlia sudah mulai bergerak menuju perairan selatan Jawa meliputi Banten. Berbagai parameter-parameter oseanografi seperti gelombang laut, umumnya akan terpengaruh secara langsung oleh angin yang bertiup di atas permukaan laut (Haryanto *et al.*, 2017). Sehingga hal tersebut juga mempengaruhi ketinggian dan propagasi gelombang signifikan yang semakin menurun dan menuju arah tenggara hingga selatan.

Pada penelitian yang dilakukan Mahsunah *et al.*, (2019), juga mengatakan bahwa kecepatan angin pada pesisir selatan Jawa relatif tinggi hingga mencapai sekitar 18 m/s, dengan ketinggian gelombang di pesisir selatan Jawa pada saat Siklon Tropis Dahlia terjadi yaitu mencapai 2.5 - 3 m. Semakin jauh jarak lintasan Siklon Tropis Dahlia, maka tinggi gelombang juga akan menurun akibat dari angin sebagai pembangkit gelombang mulai melemah.

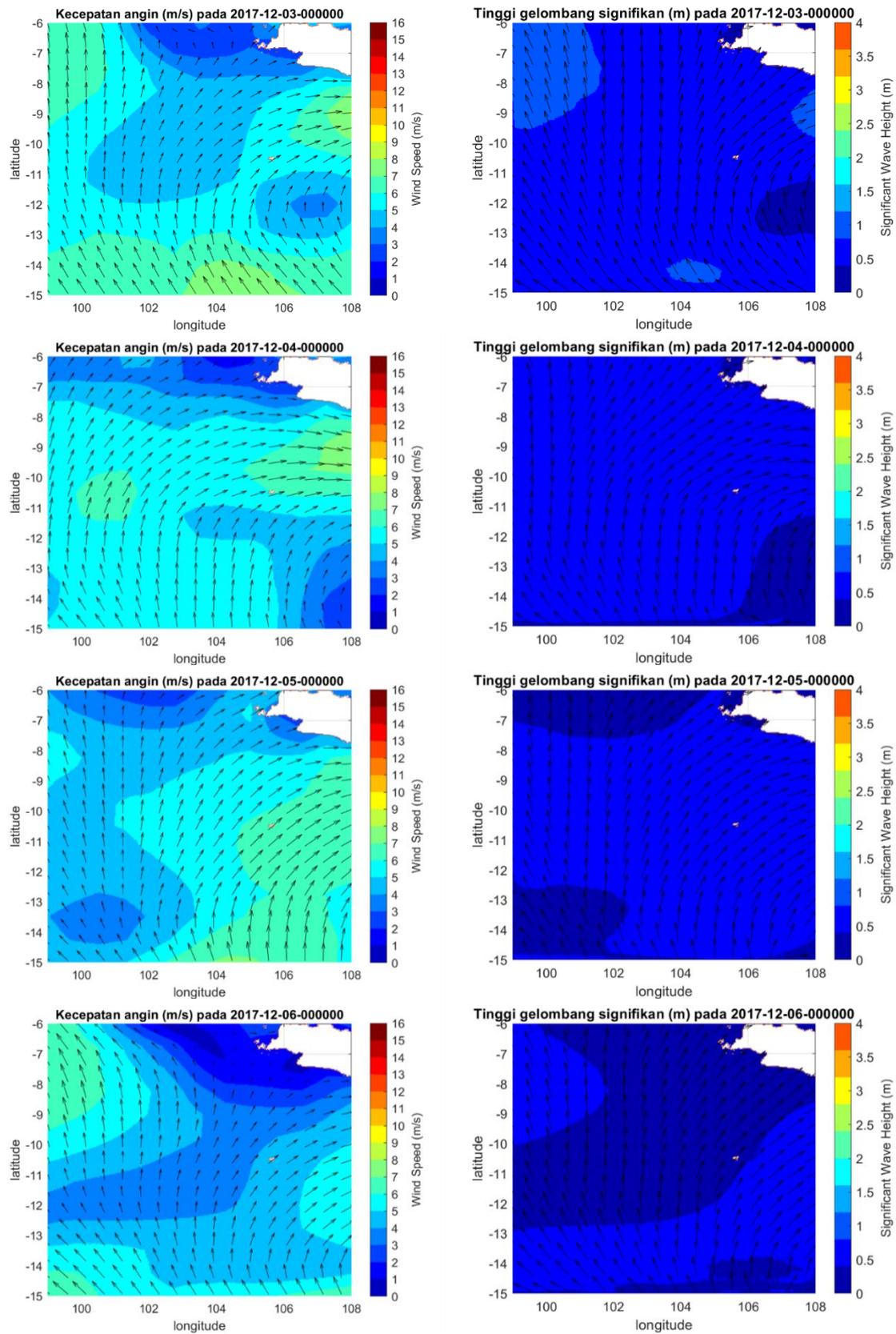
Hal ini juga selaras dengan artikel yang dikeluarkan oleh BMKG mengenai Siklon Dahlia, bahwa Siklon Tropis Dahlia dapat menimbulkan beberapa dampak seperti hujan sedang hingga lebat, angin dengan intensitas tinggi berkisar antara 10.28 m/s/ gelombang tinggi dengan ketinggian 2.5 – 4.0 m dan 4.0 – 6.0 m di beberapa wilayah. Hujan sedang hingga lebat (potensi petir) di wilayah pesisir barat Bengkulu, Lampung, Banten, DKI Jakarta dan Jawa Barat. Angin kencang (≥ 20 knot) di wilayah pesisir barat Bengkulu, Lampung, Banten (bagian selatan), dan Jawa Barat (bagian



Gambar 4. Kecepatan dan arah dari angin serta gelombang berdasarkan hasil rekonstruksi gelombang dengan model SWAN pada saat sebelum terjadi Siklon Tropis Dahlia (25 November 2017 hingga 28 Desember 2017)



Gambar 5. Kecepatan dan arah dari angin serta gelombang berdasarkan hasil rekonstruksi gelombang dengan model SWAN pada saat terjadi Siklon Tropis Dahlia (29 November 2017 hingga 2 Desember 2017)



Gambar 6. Kecepatan dan arah dari angin serta gelombang berdasarkan hasil rekonstruksi gelombang dengan model SWAN pada saat setelah terjadi Siklon Tropis Dahlia (3 Desember 2017 hingga 6 Desember 2017)

selatan). Gelombang laut tinggi (2.5 – 4.0 meter) di wilayah perairan barat Kepulauan Mentawai, Bengkulu, selatan Jawa Tengah. Gelombang laut tinggi (4.0 – 6.0 meter) di wilayah perairan Pulau Enggano, barat Lampung, Selat Sunda, selatan Banten, Jawa Barat, selatan Jawa, dan Samudra Hindia barat (BMKG, 2017).

KESIMPULAN

Pemodelan gelombang laut menggunakan SWAN menghasilkan luaran hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan data citra satelit altimetri Jason-3 dengan nilai korelasi dan RMSE sebesar 0.898 dan 1.014 m. Baik model numerik dan satelit altimetri memiliki keterbatasan masing-masing. Meskipun nilai RMSE yang dihasilkan tidak cukup rendah, namun luaran model SWAN mampu menangkap tren variabilitas tinggi gelombang signifikan yang disebabkan oleh Siklon Tropis Dahlia, dengan tinggi gelombang signifikan dan kecepatan angin mencapai 3.5 m dan 16 m/s di wilayah penelitian. Hasil ini memperlihatkan adanya propagasi ke arah tenggara menuju selatan Jawa. Dalam melakukan penelitian selanjutnya terkait pemodelan gelombang menggunakan SWAN, dapat memperhatikan sensitivitas dari *setting* parameter, misalnya menambahkan *input boundary condition*, *nesting*, *initial condition*, *input* data angin menggunakan beberapa *inputan* data, serta verifikasi menggunakan beberapa data observasi atau pengukuran lapangan. Hal ini demi dapat menghasilkan verifikasi gelombang laut yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adyanti, D.A., Novitasari, C.C.R., Asyhar, A.H. & Setiawan, F. 2018. Optimal ANFIS Model for Forecasting System Using Different FIS. *Proceeding of EECSI 2018, 16-18 October 2018*. pp.1–6.
- Akpinar, A., Vledder, G.Ph.V. & Komurcu, M.I. 2012. Evaluation of the Numerical Wave Model (SWAN) for Wave Simulatio in The Black Sea. *Continental Shelf Research*, 50–51: 80–99
- Aswad, I.A.H., Armono, H.D., Rahmawati, S., Ridlwan, A. & Ariefianto, R.M. 2021. Pemodelan Tinggi Gelombang Laut untuk Kajian Energi Gelombang Laut di Perairan Barat Provinsi Lampung. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(2): 75–84.
- Atan, R., Nash, S. & Goggins, J. 2017. Development of a nested local scale wave model for a 1/4 scale wave energy test site using SWAN. *Journal of Operational Oceanography*, 10(1): 59–78.
- BMKG. 2015. Musim Siklon di Sekitar Indonesia. Diakses pada 29 April 2024, dari <https://web-meteo.bmkg.go.id/>.
- BMKG., 2017. "Cempaka" Meluruh, Siklon Tropis "DAHLIA" Lahir, Waspada Bencana Hidrometeorologi Menghadang. Diakses pada 18 Juli 2023, dari <https://www.bmkg.go.id/>.
- Fibriantika, E. & Alhaqq, R.I., 2018. Profil Vertikal Atmosfer Selama Aktifitas Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia. *Meteorologi dan Geofisika*, 19(2): 49-58.
- Fitri, N., Muliadi. & Adriat, R., 2022. Analisis Dampak Siklon Tropis Pabuk Terhadap Unsur Cuaca di Kalimantan Barat. *Prisma Fisika*, 10(1): 14-18..
- Handoko., 2017. Klimatologi Dasar: Landasan Pemahaman Fisika Atmosfer dan Unsur-Unsur Iklim. IPB Press.
- Haryanto, Y. D., Fadlan, A., Hartoko, A., Anggoro, S. & Zainuri, M., 2017. Dampak Siklon Tropis Quang Terhadap Tinggi Gelombang, Arus Laut dan Upwelling di Perairan Selatan Jawa. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 18(1): 45-54.
- Holthuijsen, L. 2007. Waves in Oceanic and Coastal Water. Cambridge University Press.
- H Hutabarat, Y.C.T. & Darmawan, S. 2018. Analisis Karakteristik Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang Menggunakan Data Satelit Altimetri Jason-2 (Studi Kasus: Selat Karimata). *Seminar Nasional Penginderaan Jauh ke-5, 31 Juli 2018*. pp.586-595.
- Kawuwung, W.L., Tongkukut, S.H.K. & Sutikno. 2019. Analisis Pengaruh Siklon Tropis Terhadap Curah Hujan di Sulawesi Utara. *Jurnal MIPA UNSTRAT Online*, 8(1): 21-27.
- Kurniawan, R., Permana, D.S., Suratno. & M.N. Habibie. 2013. Verifikasi Luaran Model Gelombang Windwaves-05 dengan Satelit Altimeter. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 14(3): 149-158.
- Liufandy, H., Sugianto, D.N., Pranowo, W.S., Setiadi, J. & Rochaddi, B., 2022. Simulasi Numerik Dampak Badai George dan Jacob (2007) Terhadap Tinggi Gelombang Signifikan pada Laut Selatan Jawa Hingga Nusa Tenggara. *Jurnal Chart Datum*, 8(1): 15-22.
- Mahsunah, O., Widagdo, S. & Bintoro, R. S., 2019. Karakter Siklon Tropik dan Pengaruhnya Terhadap Tinggi Gelombang di Perairan Pesisir Selatan Jawa. *J-Tropimar*, 1(2): 104-116.
- Muliati, Y., Tawekal, R.L., Wurjanto, A., Kelvin,

- J. & Pranowo, W.S., 2019. Wind Wave Modelling in Natuna Sea: A Comparison Among SWAN, SEAFINE, and ERA-INTERIM. *International Journal of Geomate*, 16(54): 176-184.
- Perdana, R.B., Halida, M. & Pramono, S.A. 2020. Diurnal Rainfall on Tropical Cyclone Cempaka and Dahlia as Observed by TRMM. *Megasains*, 11(2): 42-45.
- Rafiuddin, M., Adytia, D., & Tarwidi, D. 2018. Simulasi Gelombang Laut Di Daerah Selatan Jawa Dengan Model Swan. *eProceedings of Engineering*, 2 Agustus 2018. pp.3760-3766.
- Rathore, L.S., Mohapatra, M. & Geetha, B., 2017. Collaborative Mechanism for Tropical Cyclone Monitoring and Prediction Over North Indian Ocean. Tropical Cyclone Activity over the North Indian Ocean, Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Samiksha, S.V., Jancy, L., Sudheesh, K., Kumar, V.S., & Shanias, P.R. 2021. Evaluation of wave growth and bottom friction parameterization schemes in the SWAN based on wave modelling for the central west coast of India. *Ocean Engineering*, 235: 1-15.
- Saputra, M.R., Imam., Suprayogi., Ferry., & Fatnanta. 2015. Pemecah Gelombang Kantong Pasir Tipe Tenggelam Menggunakan Artificial Neural Network (ANN). *Jom FTEKNIK*, 2(2): 1-11.
- Siahsarani, A., Khaniki, A. K., Bidokhti, A. A. A. & Azadi, M., 2020. Sensitivity Analysis of The Numerical Aspect of The SWAN for The Tropical Cyclone Wave Simulations in The Gulf of Oman. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(692): 1-14.
- Sobel, A.H., Wing, A.A., Camargo, S.J., Patricola, C.M., Vecchi, G.A., Lee, C.Y. & Tippett, M.K., 2021. Tropical Cyclone Frequency. *Earth's Future*, 9: 1-24.
- Soltanpour, M., Ranji, Z., Shibayama, T. & Ghader, S., 2021. Tropical Cyclones in The Arabian Sea: Overview and Simulation of Winds and Storm-Induced Waves. *Natural Hazard*, 108: 711-732.
- Suhardi, B., Adiputra, A. & Avrian, R., 2020. Kajian Dampak Cuaca Ekstrem Saat Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia di Wilayah Jawa Barat. *Jurnal Geografi Edukasi dan Lingkungan*, 4(2): 61-67.
- Supriyadi, E., 2019. Pemanfaatan Satelit Altimetri untuk Proses Verifikasi Tinggi Gelombang Laut Signifikan pada Ocean Forecast System (OFS) – BMKG. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 19(2): 93-102.
- Suryanto, W. & Luthfian, A., 2016. Pengantar Meteorologi. Gadjah Mada University Press.
- Syaifullah, M.D., 2015. Siklon Tropis, Karakteristik dan Pengaruhnya di Wilayah Indonesia pada Tahun 2012. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 16(2): 61-71.
- Tabana, O.Y.S., Purnama, M.M.E. & Rammang, N. 2023. Dampak Siklon Tropis Seroja Terhadap Ketersediaan Pakan, Tempat Bersarang dan Pendapatan Petani Lebah Madu Hutan (*Apis dorsata*). *Jurnal Wana Lestari*, 7(1): 111-117.
- The SWAN team., 2023. SWAN: Scientific and Technical Documentation. Delft University of Technology.
- Triatmodjo, B. 2016. Teknik Pantai. Yogyakarta: Beta Offset.
- Tribunnews. 2017. Setelah Diterjang Cuaca Ekstrem, Dampak Siklon Tropis Dahlia, Bandung Jadi Lebih Dingin. Diakses pada 21 Mei 2024, dari <https://banjarmasin.tribunnews.com/>.
- Windupranata, W. Nusantara, C.A.D.S., Wijaya, D.D. & Prijatna, K. 2019. Impact Analysis of Tropical Cyclone Cempaka-Dahlia on Wave Heights in Indonesian Waters from Numerical Model and Altimetry Satellite. *The 1st International Conference on Geodesy, Geometrics, and Land Administration*, p.203–204.
- Windupranata, W., Wijaya, D.D. & Nusantara, C.A.D.S. 2018. Analisis Dampak Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia Terhadap Tinggi Gelombang Perairan Provinsi Lampung Hingga Bali. *Prosiding: Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XV ISOI 2018, 1-3 November 2018*. p.11-27.
- Wiwit, S. & Luthfian, A. 2016. Pengantar Meteorologi. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- WMO. 2018. Guide to Wave Analysis and Forecasting. World Meteorological Organization.
- Yang, J., Zhang, J., Jia, Y., Fan, C. & Cui, W. 2020. Validation of Sentinel-3A/3B and Jason-3 Altimeter Wind Speeds and Significant Wave Heights Using Buoy and ASCAT Data. *Remote Sensing*, 12(2079): 1–17.
- Yuliani, A.D. & Rejeki, H.A. 2020. Pengaruh Gelombang Terhadap Abrasi di Pesisir Kabupaten Demak, Kendal, dan Kota Semarang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(4): 1-8