Respon Perairan Terhadap Siklon Tropis Cempaka-Dahlia Di Perairan Selatan Jawa

Muhammad Hafidz Ibnu Khaldun[1]*, Wiwid Andriyani Lestariningsih[2] Lora Santika[3], Septy Heltria[3]

[1]Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Fakultas Peternakan, Universitas Jambi
Jl. Jambi – Muara Bulian No.KM. 15, Mendalo Darat, Kec. Jambi Luar Kota, Kabupaten Muaro Jambi, Jambi
[2]Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram
Jl. Majapahit No.62, Gomong, Kec. Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat
[3]Forum Ilmiah Pengelolaan Perikanan Berkelanjutan (FIP2B)
Jl. Semanggi No. 11 Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, 83124
Email: *mhikhaldun@unja.ac.id

Abstrak

Siklon Cempaka-Dahlia (CD) yang terjadi di perairan Selatan Jawa merupakan fenomena yang menarik karena terjadi di daerah tropis yang umumnya jarang mengalami pembentukan siklon, terutama dekat ekuator. Siklon tropis yang melintasi suatu perairan mengakibatkan dampak pada lapisan permukaan dan kolom perairan secara biofisik. Aktifitas perikanan di perairan Selatan Jawa termasuk tinggi sehingga pemahaman menyeluruh mengenai dampak siklon diperlukan untuk memperoleh informasi terkait pengelolaan perikanan di masa depan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalis respon permukaan dan kolom perairan sebelum, selama, dan setelah siklon CD dengan menggunakan data Copernicus dan Argo Float yang terletak pada jalur siklon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan arus permukaan satu setengah kali selama siklon dan bergerak membentuk eddy selaras dengan angin permukaan. Eddy menyebabkan divergensi sehingga air pada kolom perairan yang dingin bergerak naik ke lapisan permukaan melalui proses ekman pumping menyebabkan penurunan suhu hingga 0,64°C. Selain itu, Ekman pumping menyebabkan massa air yang kaya nutrien ikut terangkat ke lapisan permukaan dan meningkatkan produktifitas primer di kedalaman lapisan campuran selama sembilan hari dengan jeda waktu 4-6 hari setelah terjadi siklon CD. Produktifitas primer yang meningkat diperoleh dari peningkatan konsentrasi klorofil-a dari 0,092 mg/m^{3}menjadi 0,1789 mg/m^3.

Kata kunci: Ekman pumping, Klorofil-a, Respon Perairan, Selatan Jawa, Siklon tropis

Abstract

Ocean Response to Tropical Cyclone Cempaka-Dahlia at Southern Java Sea Waters

The Cempaka-Dahlia (CD) cyclone that occurred in the waters of Southern Java is a fascinating phenomenon because it took place in a tropical region where cyclones rarely form, especially near the equator. Tropical cyclones passing through a body of water have significant biophysical impacts on both the surface layer and the water column. The waters of Southern Java have high fishing activity, making it crucial to comprehensively understand the impacts of cyclones to obtain information relevant to future fisheries management. This study aims to analyze the response of the surface and water column before, during, and after the CD cyclone using data from Copernicus and Argo Float, located along the cyclone's path. The results show that surface current speed increased by one and a half times during the cyclone and formed an eddy that moved in alignment with surface winds. The eddy caused divergence, bringing colder water from the deeper layers to the surface through the Ekman pumping process, which led to a temperature decrease of up to 0.64°C. Additionally, Ekman pumping transported nutrient-rich water to the surface, enhancing primary productivity in the mixed layer for nine days, with a lag time of 4–6 days after the CD cyclone occurred. The increased primary productivity was reflected in the rise of chlorophyll-a concentration from 0.092 mg/m³ to 0.1789 mg/m³.

.

Keywords: *Ekman Pumping, Chlorophyll-a, Ocean Response, South Java, Tropical cyclone*

PENDAHULUAN

Siklon tropis (TC) merupakan badai yang umumnya terjadi di daerah sub-tropis dengan proses pembentukan bibit siklon di wilayah tropis yang memiliki suhu perairan hangat dan lembab (Koropitan *et al.*, 2022). Secara umum, TC dikaitkan dengan dampak negatif seperti cuaca ekstrim secara langsung (pada jalur siklon) dan tidak langsung (luar jalur siklon) menimbulkan kerugian secara materil dan korban jiwa (Khaldun *et al.*, 2020; Setiawan *et al.*, 2024). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa TC meningkatkan curah hujan,

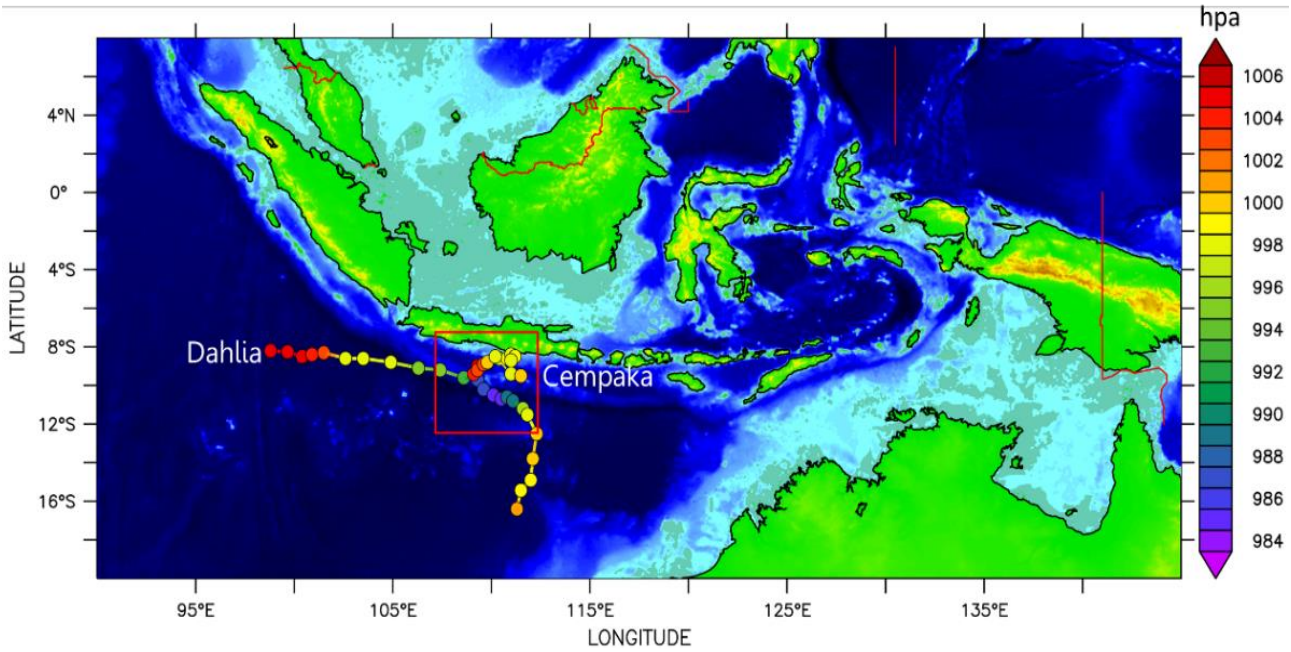
Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

ketinggian gelombang laut secara signifikan (Ginanjar *et al.,* 2020; Syaifullah, 2015). Selain itu, TC dapat menyebabkan perubahan stratifikasi pada kolom perairan di tenggara Samudra Hindia hingga kedalaman tertentu (Khaldun *et al.,* 2020; Korty *et al.,* 2008).

Perairan Selatan Jawa atau Tenggara Samudera Hindia merupakan salah satu wilayah yang dapat mengalami pembentukan TC, namun sangat sedikit pembentukan dan jalur lintasan siklon yang mendekati wilayah Indonesia khususnya pulau jawa (Khaldun *et al.,* 2020). Salah satu TC yang pembentukan dan jalur lintasanya sangat dekat dengan wilayah daratan Indonesia adalah siklon CD. Siklon CD yang terjadi di perairan Selatan Jawa merupakan hal yang menarik karena terjadi di daerah tropis dan dekat ekuator dengan kategori 2 skala Saffir-Simpson (Windupranata *et al.,* 2019; Yang *et al.,* 2020). Siklon CD menyebabkan cuaca ekstrim di wilayah Indonesia khususnya pulau Jawa, seperti peningkatan curah hujan berkisar antara 100-150 milimeter (Perdana *et al.,* 2020; Suhardi *et al.,* 2020), peningkatan gelombang signifikan (Windupranata *et al.,* 2019) dan penurunan suhu perairan (Chacko & Zimik, 2018; Efendi *et al.,* 2018).

Perairan Selatan Jawa termasuk dalam Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPP-NRI) 573 memiliki potensi perikanan yang besar khususnya ikan pelagis kecil hingga pelagis besar seperti lemuru, Tuna mata besar (*Thunnus obesus*), *Yellowfin tuna*, dan marlin (Triyono *et al.,* 2019; Lumban-Gaol *et al.,* 2015; Grande *et al.,* 2019). Produktifitas perikanan pelagis yang tinggi diduga berkaitan dengan tingginya prodiktifitas primer suatu perairan yang diinduksi oleh proses upwelling (Fitrianah *et al.,* 2016; Grande *et al.,* 2019; Lumban-Gaol *et al.,* 2015). TC merupakan salah satu faktor yang memberikan dampak pada lapisan permukaan dan kolom perairan secara biofisik sehingga menginduksi terjadinya *upwelling* yang mengakibatkan suatu perairan mengalami peningkatan nutrient yang diindikasikan oleh peningkatan klorofil (Koropitan *et al.,* 2022).

Upwelling yang terjadi karena TC akan memberikan tingkatan dampak yang bervariasi tergantung intensitas siklon dan tempat terjadinya (Korty *et al.,* 2008). Namun, penelitian mengenai dampak dan respon perairan terhadap kejadian TC yang masih sedikit, sehingga informasi tentang dampak fenomena siklon pada perairan dan produktifitas primer perlu dikaji secara komprehensif agar mendapatkan pemahaman yang lebih baik dimasa mendatang. Penelitian ini akan menganalisis respon permukaan dan kolom perairan sebelum, selama, dan setelah siklon CD dengan menggunakan data Copernicus dan Argo float yang berada pada jalur siklon sehingga diharapkan mampu memberikan informasi yang lebih detil mengenai hubungan peningkatan produktifitas primer dan kejadian siklon.



Gambar 1. Lokasi penelitian siklon CD. Dot berwarna merupakan lintasan siklon tropis dan nilai tekanannya tanggal 26 Nov – 02 Des 2017. Kotak merah merupakan daerah pengamatan saat siklon mencapai kategori 2.

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

MATERI DAN METODE

Siklon CD merupakan siklon kategori 2 skala Saffir-Simpson yang terjadi dari 26 November 2017 – 02 Desember 2017 dengan intensitas tertinggi terjadi saat tanggal 1 Desember 2018. Data siklon tropis pada penelitian ini dihimpun dari *Australian Bureau of Meteorology* (BOM) yang diakses melalui website BOM (www.bom.gov.au). Informasi yang diperoleh berupa tekanan udara (mbar atau hPa), waktu (waktu dalam *Coordinated Universal Time*-UTC), dan koordinat lokasi siklon tropis dengan selang waktu 6 jam.

Pengamatan lapisan permukaan perairan dianalisis menggunakan datas citra satelit yang diperoleh dari Marine Copernicus (https://marine.copernicus.eu). Data suhu permukaan laut menggunakan data *The Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis* (OSTIA) yang memiliki resolusi spasial 0,05° x 0,05° dan resolusi temporal harian (Donlon *et al.*, 2012). Data kedalaman lapisan campuran (MLD) diperoleh dari ARMOR3D dengan resolusi spasial 0,25° x 0,25° dan resolusi temporal mingguan (Guinehut *et al*., 2012; Mulet *et al.*, 2012). Data angin permukaan memiliki resolusi spasial 0,25° x 0,25° dan resolusi temporal per 6 jam. Data arus laut memiliki resolusi spasial 0,25° x 0,25° dan resolusi temporal harian (Rio *et al.*, 2014). Data konsentrasi klorofil-a memiliki resolusi spasial 4 km x 4 km dan resolusi temporal harian. Pengamatan kolom perairan dianalisis menggunakan Argo float 5905017 *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO) Australia. Data Argo ini dipilih karena lokasinya yang berada pada lintasan siklon tropis sehingga dapat memberikan informasi spesifik untuk pengamatan siklon CD di selatan jawa.

Analisis spasial dibagi menjadi tiga fase, yaitu pra-siklon, siklon, dan pasca-siklon dengan menganalisis secara harian. Data dengan resolusi temporal 6 jam dilakukan analisis secara spasial dengan melakukan perata-rataan harian dengan menggunakan persamaan berikut (Emery & Thomson, 1998):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

Dimana x adalah nilai rata-rata, xi adalah nilai sampel, dan n adalah jumlah data. Analisis kecepatan angin, arus dan arahnya diperoleh dengan menghitung hasil komponen u dan v menggunakan persamaan berikut:

$$\mathrm{U} = \sqrt{\mathrm{u}^2 + \mathrm{v}^2}$$

$$\theta = arctan\frac{v}{u}$$

Dimana, U adalah vektor resultan u dan v (m/s), u adalah kecepatan angin atau arus dalam arah x (m/s), v adalah kecepatan angin atau arus dalam arah y (m/s), adalah arah angin (°). *Ekman Pumping Velocity* (EPV) diperoleh dengan menggunakan data angin, nilai EPV positif (negatif) menunjukkan peristiwa *upwelling* (*downwelling*). Perhitungan EPV dapat menggunakan persamaan berikut :

$$wind\ stress, \tau = \rho_{air} C_d U^2$$

$$EPV = Curl(\tau)/\rho_w xf$$

dimana, ρ_{air} adalah densitas udara (1,25 kg/m^3), $C_d$adalah koefisien gesekan angin, U adalah kecepatan angin, ρ_w adalah densitas air laut (1025 kg/m^3), dan f adalah parameter Coriolis (Chacko & Zimik, 2018).

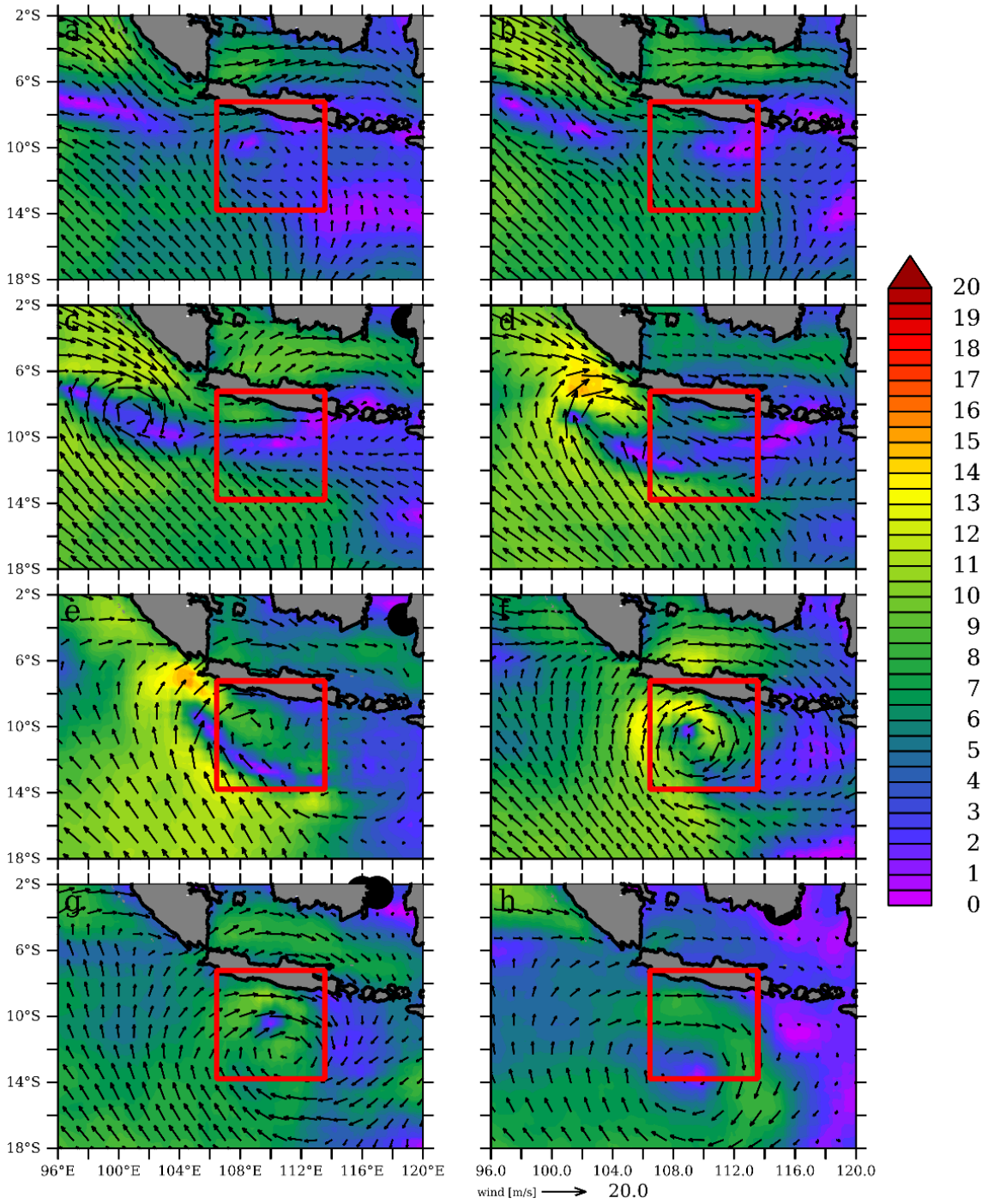
HASIL DAN PEMBAHASAN

Respon lapisan permukaan

Respon lapisan permukaan laut yang paling mudah diamati adalah kecepatan angin dan kecepatan arus permukaan. Kecepatan rerata angin sebelum siklon (19-25 November 2017) di daerah siklon CD sekitar 5,29 m/s, saat siklon berlangsung (26 November 2017 – 02 Desember 2017) kecepatan angin rata-rata 5,68 m/s, dan setelah siklon (3-9 Desember 2017) kecepatan angin rerata 4,57 m/s. Siklon mencapai intensitas tertinggi pada 1 Desember menunjukkan kecepatan angin mencapai kecepatan maksimum hingga 7,67 m/s (Gambar 2f). Gambar 2 menunjukkan bagaimana pergerakan dan distribusi siklon CD ditunjukkan oleh vektor angin. Peningkatan kecepatan angin berbanding lurus dengan peningkatan intensitas siklon (Chacko & Zimik, 2018; Haryanto *et al.*, 2017). Pola pergerakan vektor angin searah jarum jam yang menunjukkan pergerakan yang selaras pola siklon. Pergerakan siklonik tersebut dapat memicu divergensi di muka air laut sehingga menyebabkan terjadinya proses upwelling (Ismoyo & Putri, 2014; Koropitan *et al.*, 2022).

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

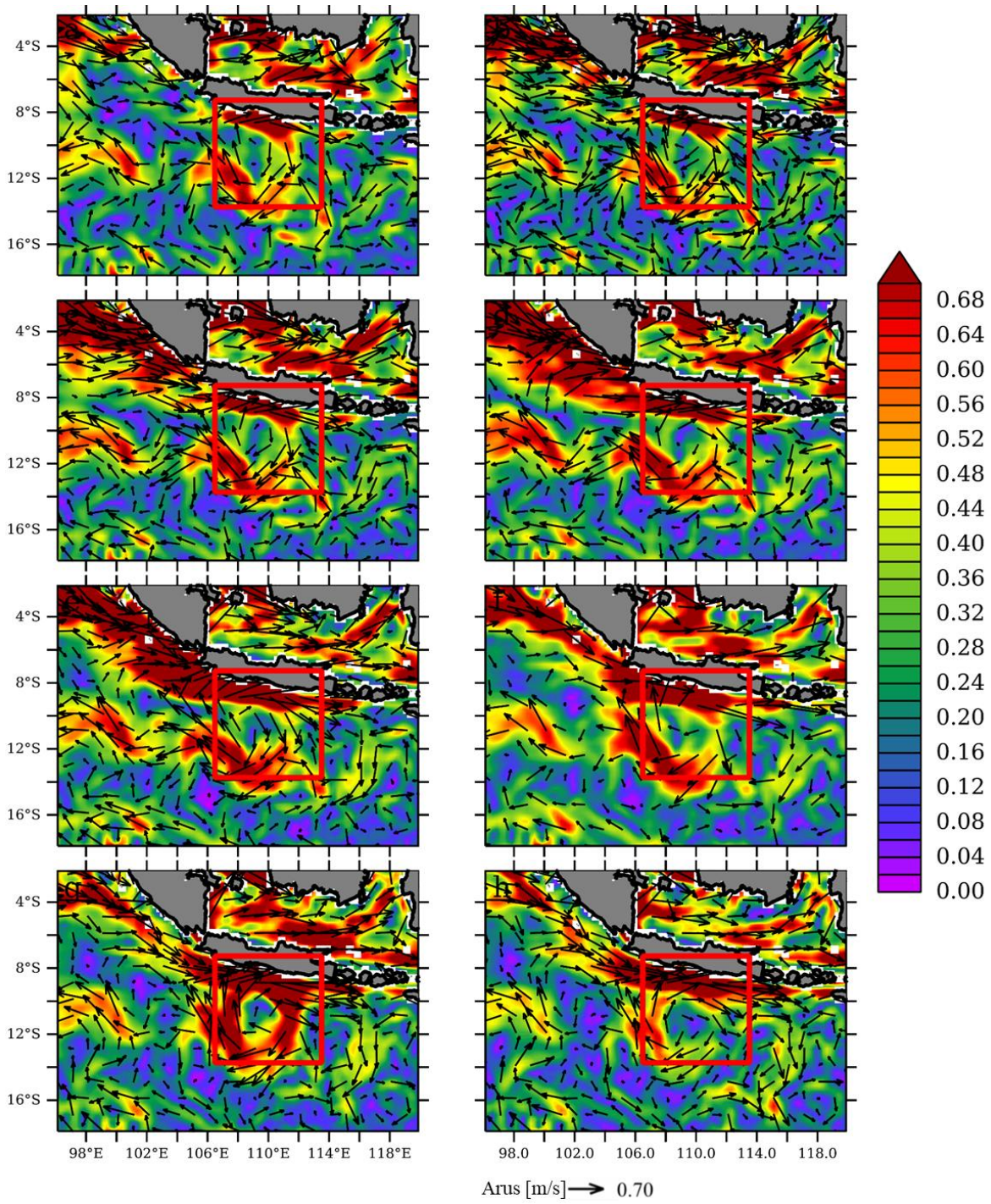
Analisis data menunjukkan peningkatan kecepatan arus permukaan dijalur siklon dengan pola pergerakan vektor arus searah jarum jam yang menunjukkan pergerakan yang selaras pola siklon. Kecepatan rerata arus sebelum siklon di daerah siklon CD sekitar 0,45 m/s, saat siklon berlangsung kecepatan arus rerata 0,56 m/s, dan setelah siklon kecepatan arus rerata 0,5 m/s. Siklon mencapai intensitas tertinggi pada 1 Desember menunjukkan kecepatan arus mencapai kecepatan maksimum hingga 0,68 m/s (Gambar 3f). Pengaruh siklon tropis pada arus diilustrasikan oleh kecepatan arus, yang meningkat seiring berjalannya siklon.



Gambar 2. Kecepatan angin (m/s) dan vektor angin. a) siklon 26 Nov 2017, b) siklon 27 Nov 2017, c) siklon 28 Nov 2017, d) siklon 29 Nov 2017, e) siklon 30 Nov 2017, f) siklon 1 Des 2017, g) siklon 2 Des 2017, h) siklon 3 Des 2017. Skala warna menunjukkan kecepatan angin, vektor hitam menunjukkan arah dan kecepatan angin.

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

Peningkatan kecepatan arus dan angin selama siklon CD memicu pencampuran vertikal yang membawa massa air kaya nutrien ke permukaan, menurunkan suhu laut, dan meningkatkan produktivitas primer. Kenaikan klorofil-a pasca siklon menunjukkan peningkatan kesuburan perairan, yang dapat memengaruhi distribusi zooplankton dan ikan pelagis. Dengan demikian, siklon tropis tidak hanya berdampak pada dinamika fisik perairan tetapi juga ekosistem laut dan stok perikanan di perairan Selatan Jawa. Selama siklon tropis, energi potensial dan energi kinetik terjadi di permukaan laut. Besarnya energi potensial dan energi kinetik



Gambar 3. Kecepatan arus (m/s) dan vektor arus. a) siklon 26 Nov 2017, b) siklon 27 Nov 2017, c) siklon 28 Nov 2017, d) siklon 29 Nov 2017, e) siklon 30 Nov 2017, f) siklon 1 Des 2017, g) siklon 2 Des 2017, h) siklon 3 Des 2017 Skala warna menunjukkan kecepatan arus. Vektor hitam menunjukkan arah dan kecepatan arus.

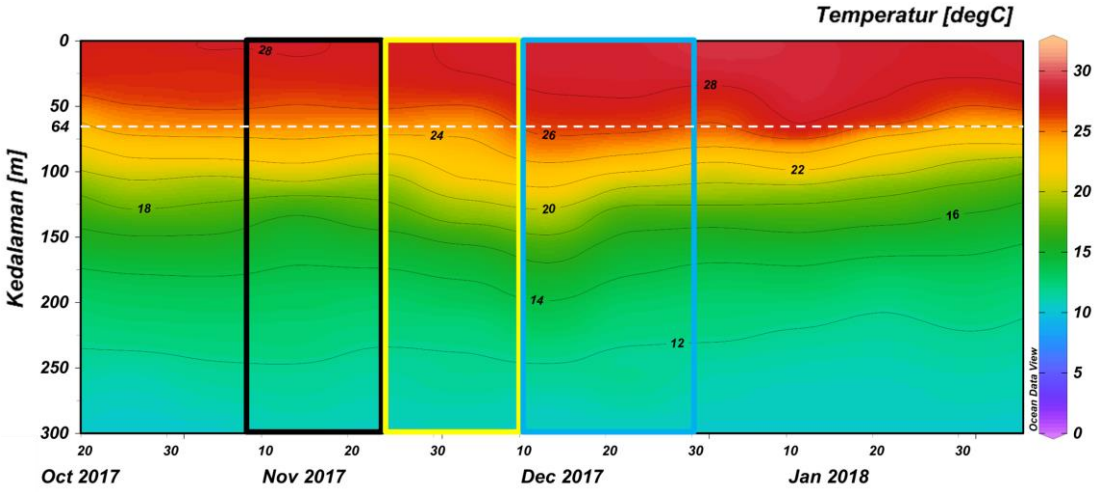
Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

yang terbentuk sangat bergantung pada intensitas siklon tropis (Khaldun *et al.*, 2020; Korty *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2020).

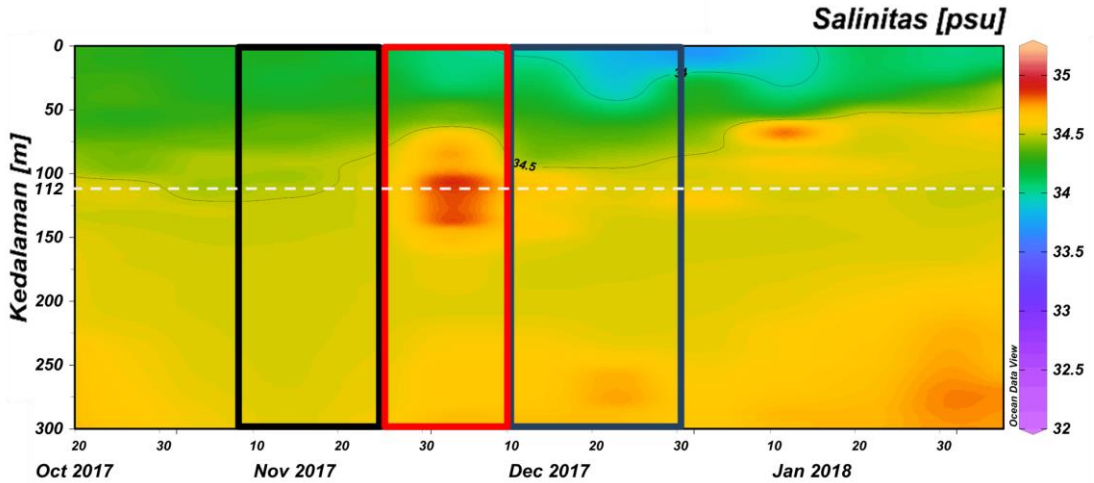
Vektor angin dan arus harian dari 26 November 2017 – 02 Desember 2017 disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Jelas terlihat propagasi pergerakan vektor siklonik yang terbentuk di Perairan selatan Jawa membentuk zona konvergensi yang bergerak dari dari perairan barat menuju timur hingga punah saat memasuki lintang tinggi. Kondisi ini menyebabkan perairan yang lebih tenang pasca terjadinya siklon dan akan memasuki fase musim peralihan monsun (Yang *et al.*, 2020).

Respon Kolom Perairan (Suhu dan Salinitas)

Siklon tropis tidak hanya memberikan pengaruh pada lapisan permukaan laut, namun secara vertikal pada kolom perairan juga menunjukkan respon pada parameter fisik dan biologis (Domingues *et al.* 2015; Chacko & Zimik 2018; Khaldun *et al.* 2020). Analisis respon yang ditunjukkan pada penelitian ini didapatkan melalui pengamatan data Argo Float yang terletak didekat lintasan siklon CD. Stratifikasi massa air diwilayah kajian dalam rentang waktu 10 November – 23 Desember 2017 dapat terlihat melalui sebaran melintang temperatur dan salinitas pada kedalaman 0-300 m (Gambar 4 dan Gambar 5). Profil suhu secara menegak dibedakan menjadi tiga lapisan yakni lapisan tercampur, lapisan termoklin, dan lapisan dalam. Stratifikasi massa air dapat ditentukan berdasarkan gradien temperatur (ΔT) (Hao *et al.*, 2012). Korty *et al.* (2008) menyatakan bahwa siklon tropis dapat dapat memperkuat *mixing* pada lapisan permukaan saat siklon punah dan radiasi matahari meningkat signifikan. Hal ini tentu akan sangat berpengaruh pada lapisan permukaan dan kolom perairan.



Gambar 4. Distribusi vertikal suhu. Kotak hitam sebelum siklon, kotak kuning saat siklon berlangsung , kotak biru siklon.



Gambar 5. Distribusi vertikal salinitas. Kotak hitam sebelum siklon, kotak merah saat siklon berlangsung , kotak abu-abu siklon.

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

Distribusi vertikal memperlihatkan bagaimana pengaruh siklon tropis terhadap profil perairan secara temporal. Distribusi vertikal suhu kolom perairan pada 10 November 2017 sebelum terjadinya siklon CD tercatat suhu dengan rentang 25,1ºC berada kedalaman 64 m, dengan analisis kedalaman lapisan tercampur mencapai kedalaman 21,65 m (Gambar 4). Distribusi vertikal salinitas sebelum terjadinya siklon CD dengan nilai salinitas 34,5 psu berada pada kedalaman 112 m (Gambar 5). Analisis distribusi vertikal saat terjadinya siklon pada intensitas tertinggi (1 Desember 2017) menunjukkan suhu dengan rentang 25,1ºC berada kedalaman 55,9 m, analisis kedalaman lapisan tercampur tercatat pada kedalaman 24,69 m (Gambar 4). Distribusi vertikal salinitas saat terjadinya siklon CD dengan nilai salinitas 34,5 psu berada pada kedalaman 64 m (Gambar 5). Analisis sebelum dan saat siklon memperlihatkan ada perubahan nilai suhu dan salinitas yang menunjukkan adanya pergerakan massa air menuju lapisan permukaan, tercatat pada suhu kolom perairan dengan nilai 25,1ºC awalnya berada pada kedalaman 64 m dan saat siklon ditemukan pada kedalaman 55,9 m. Hal ini menunjukkan adanya pergerakan massa air dari proses *upwelling* dari sejauh 8,1 m ke lapisan permukaan (Yang *et al.,* 2020). Saat siklon tropis melintasi perairan, akan mengakibatkan terjadinya *upwelling.* Proses *upwelling* dapat diketahui dengan melihat adanya massa air yang bersuhu rendah bergerak naik menuju kepermukaan.

Analisis distribusi vertikal setelah terjadinya siklon (23 Desember 2017) menunjukkan terdapat suhu dengan yang relatif sama dari permukaan hingga kedalaman 42 m dengan nilai suhu 28,25ºC, analisis kedalaman lapisan tercampur menunjukkan bahwa kedalaman MLD berada pada kedalaman 20,53 m (Gambar 4). Hal ini menunjukkan kondisi kolom perairan yang mulai stabil. Distribusi vertikal salinitas setelah terjadinya siklon CD dengan nilai salinitas 34,5 psu berada pada kedalaman 96 m (Gambar 5). Hal menarik terlihat adanya salinitas tinggi yang terisolasi pada kolom perairan dengan nilai salinitas 35,01 psu. Hal ini diduga karena saat siklon dan setelah siklon pada lapisan yang lebih dangkal, anomali suhu massa air yang hangat masih ada dan terisolasi dari lapisan permukaan karena mixing atau percampuran saat proses upwelling (Emanuel, 2001; Koropitan *et al.,* 2022; Yang *et al.,* 2020). Korty *et al.* (2008) mengungkapkan bahwa siklon tropis merupakan salah satu sumber energi yang dapat menyebabkan terjadinya percampuran vertikal. Semakin tebalnya MLD akan membuat lapisan isothermal pada perairan semakin menipis, ketika lapisan isotermal tersebut menipis maka proses percampuran vertikal semakin mudah terjadi dan berlangsung lebih kuat karena adanya umpan balik stratifikasi (Korty *et al.* 2008).

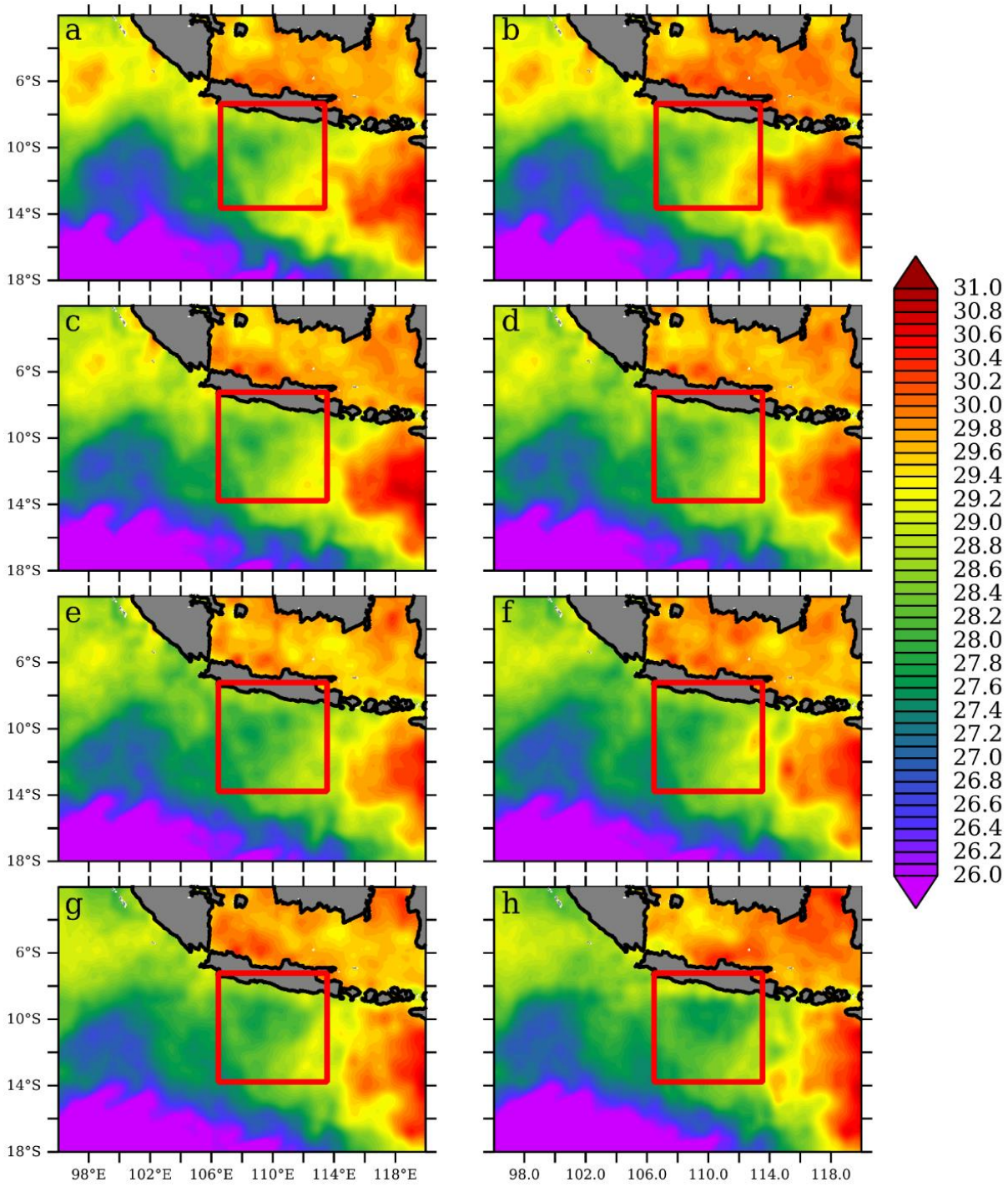
Profil distribusi vertikal suhu dan salinitas setelah siklon menunjukkan pada kedalaman 0 - 42 m relatif sama 28,25ºC dan salinitas 34 psu. Hal ini diduga karena setelah siklon pada lapisan yang lebih dangkal, anomali suhu massa air yang hangat masih ada dan terisolasi dari lapisan permukaan karena *mixing*. Hal serupa juga diungkapkan oleh Koropitan *et al.* (2022); Korty *et al.* (2008) yang menduga bahwa adanya kolom perairan yang memiliki suhu hangat dan salinitas rendah berada di lapisan tercampur dan bertahan lebih lama. Waktu yang diperlukan lautan untuk pulih karena pengaruh siklon tropis dapat sangat bervariasi mulai dari beberapa hari hingga beberapa minggu (Mrvaljevic *et al.* 2013; Yan *et al.* 2017; Chacko & Zimik 2018). Proses pencampuran yang terjadi akibat siklon ini penting dalam mempengaruhi dinamika termal dan salinitas di kolom air, terutama di lapisan tercampur, yang berdampak pada waktu pemulihan lautan dari gangguan fisik tersebut.

Respon Suhu Permukaan Laut

Perubahan suhu permukaan laut (SPL) yang terjadi selama siklon CD dapat dilihat pada Gambar 6, saat terjadinya siklon tropis diketahui terjadi penurunan SPL di sekitar jalur siklon CD. SPL sebelum siklon (19-25 November 2017) di daerah siklon CD rata-rata 28,5ºC, saat siklon berlangsung (26 November 2017 – 02 Desember 2017) SPL rerata 28,46ºC, dan setelah siklon (3-9 Desember 2017) SPL rerata 28,37ºC. Hasil pengamatan secaraharian menunjukkan bahwa penurunan nilai SPL dari 28,78 ºC pada 26 November terus menurun hingga fase puncak siklon pada 1 Desember mencapai 28,35 ºC. Proses pendinginan atau penurunan nilai SPL di sepanjang jalur siklon juga terjadi pada setiap siklon yang terjadi di Jawa Selatan berlangsung beberapa hari hingga mencapai suhu terendah pada 5 Desember 2017 tercatat 28,14 ºC. Nilai SPL yang awalnya tinggi atau hangat akan menjadi pemasukan panas siklon sebagai sumber energi untuk mempertahankan eksistensinya untuk melakukan pergerakan yang lebih panjang. Setiap siklon memiliki

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

ambang batas SPL yang berbeda, setiap siklon memiliki nilai SPL yang berbeda-beda dalam mengalami intensitas (energi meningkat), de-intensifikasi (penurunan energi), re-curvature (defleksi), bahkan disipasi (menghilang) (Chacko & Zimik, 2018; Sandery *et al.*, 2010). Setelah siklon tropis CD punah, terlihat SPL perlahan meningkat hingga mencapai 28,7 ^{o}C. Analisis pra-siklon dan setelah siklon menunjukkan perbedaan suhu sebesar 0,64^{o}C. Perbedaan tersebut menunjukkan respon laut terhadap siklon tropis yang melalui mekanisme upwelling menyebabkan perbedaan suhu sebelum dan setelah siklon pada daerah yang dilaluinya (Koropitan *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2020).

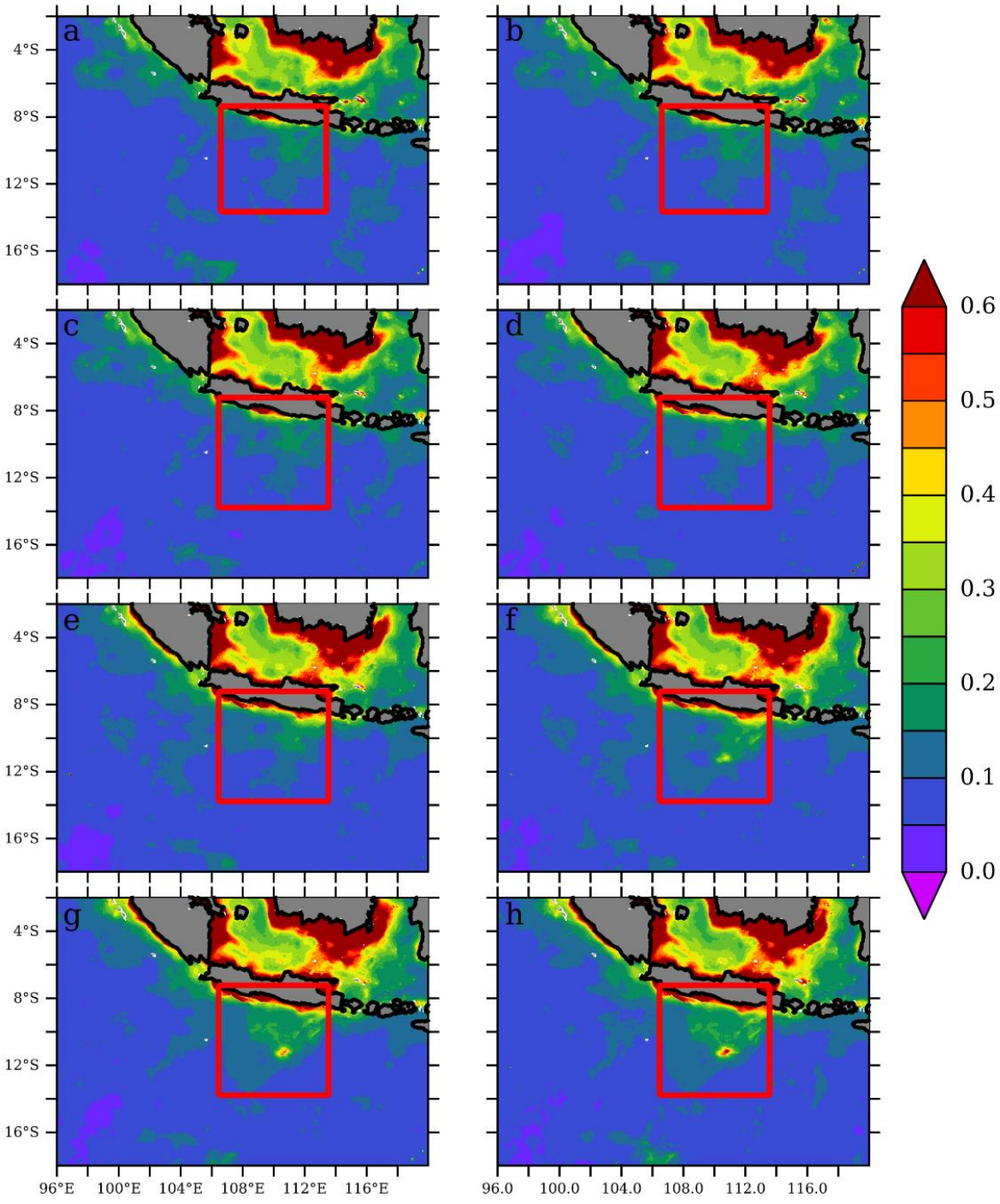


Gambar 6. Respon suhu permukaan laut. a) siklon 26 Nov 2017, b) siklon 27 Nov 2017, c) siklon 28 Nov 2017, d) siklon 29 Nov 2017, e) siklon 30 Nov 2017, f) siklon 1 Des 2017, g) siklon 2 Des 2017, h) siklon 3 Des 2017. Skala warna menunjukkan nilai suhu permukaan laut.

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

Respon biologis

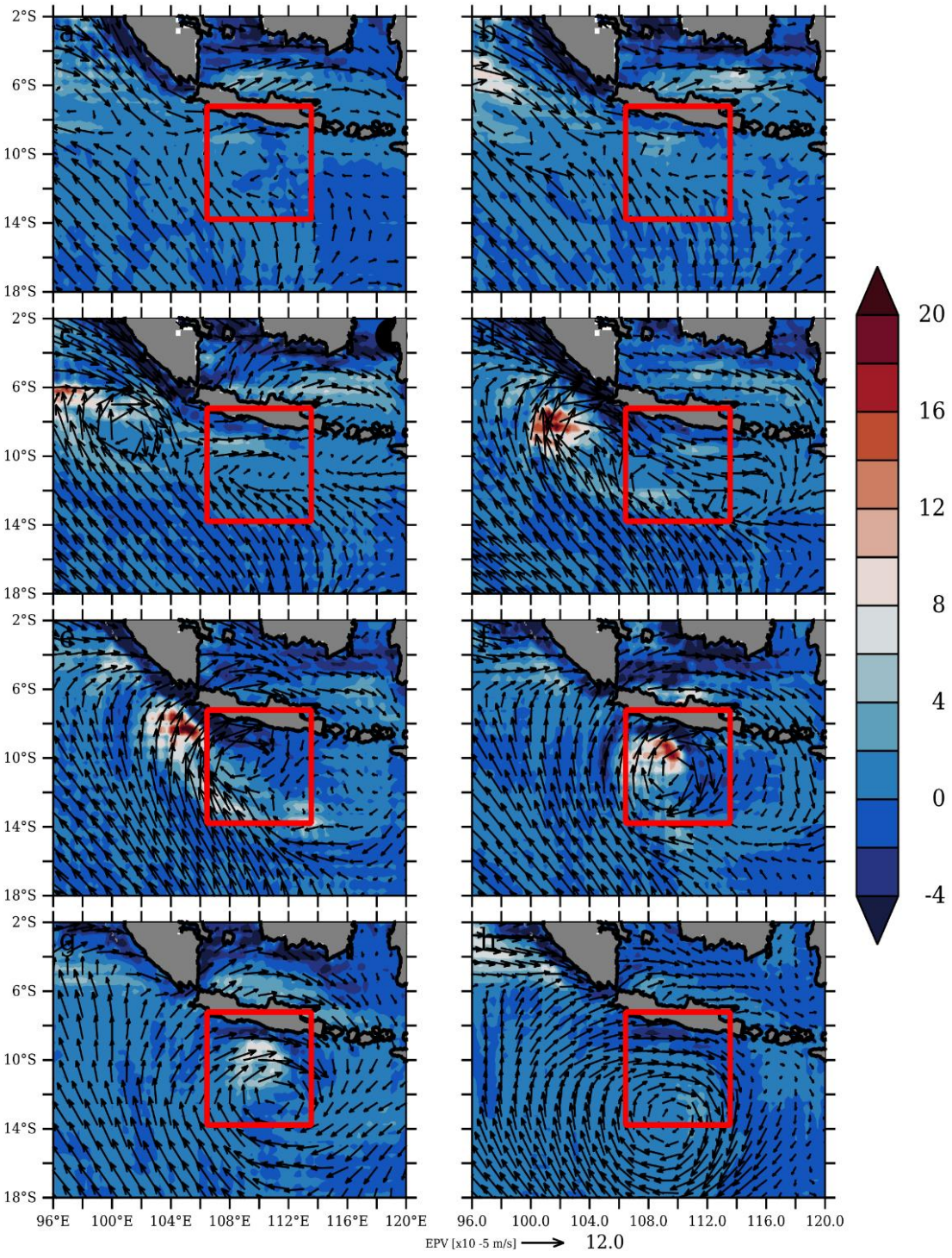
Respon klorofil-a spasial dan temporal terhadap lapisan permukaan laut yang dipengaruhi oleh siklon CD ditunjukkan pada Gambar 7. Konsentrasi klorofil-a sebelum siklon (19-25 November 2017) di daerah siklon CD rata-rata 0,10 mg/m^3, saat siklon berlangsung (26 November 2017 – 02 Desember 2017) konsentrasi klorofil-a rerata 0,13 mg/m^3, dan setelah siklon (3-9 Desember 2017) konsentrasi klorofil-a rerata 0,15 mg/m^3. Pada tanggal 1 Desember terjadi siklon tropis dengan internsitas tinggi melintasi daerah tersebut, terjadi peningkatan konsentrasi klorofil-a 0,15 mg/m^3, namun respon klorofil-a menunjukkan peningkatan konsentrasi



Gambar 7. Respon klorofil-a. a) siklon 26 Nov 2017, b) siklon 27 Nov 2017, c) siklon 28 Nov 2017, d) siklon 29 Nov 2017, e) siklon 30 Nov 2017, f) siklon 1 Des 2017, g) siklon 2 Des 2017, h) siklon 3 Des 2017 Skala warna menunjukkan nilai klorofil-a

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

tertinggi pada waktu lain yaitu pada tanggal 5 Desember yang mencapai 0,1789 mg/m^3 atau hampir 2 kali lebih besar dari konsentrasi rata-rata sebelum siklon sekitar 0,1 mg/m^3. Hasil ini menunjukkan adanya jeda waktu antara terjadinya siklon tropis dengan proses pengayaan unsur hara di sekitar kawasan siklon tropis. Setelah 11 Desember, konsentrasi klorofil-a terus menurun hingga mencapai nilai rata-rata. Respon ini menunjukkan bahwa siklon CD dapat menyebabkan peningkatan klorofil-a selama dua minggu setelah siklon.



Gambar 8. Respon *ekman pumping velocity*. a) siklon 26 Nov 2017, b) siklon 27 Nov 2017, c) siklon 28 Nov 2017, d) siklon 29 Nov 2017, e) siklon 30 Nov 2017, f) siklon 1 Des 2017, g) siklon 2 Des 2017, h) siklon 3 Des 2017 Skala warna menunjukkan nilai *ekman pumping velocity* (EPV)

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

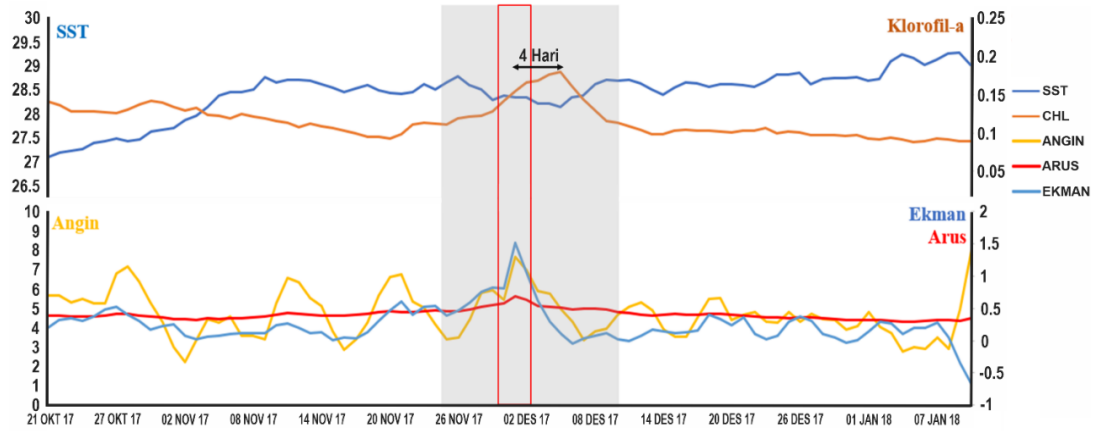
Beberapa faktor sangat mempengaruhi proses peningkatan konsentrasi klorofil-a di lapisan permukaan laut salah satunya adalah EPV. EPV merupakan parameter yang dapat digunakan untuk menentukan proses upwelling, yang menunjukkan proses fisik yang mengakibatkan peningkatan massa air dingin yang kaya nutrisi dari kolom air ke permukaan. Angin yang dihasilkan oleh siklon tropis menghasilkan fenomena EPV; nilai positif (negatif) akan menunjukkan peristiwa upwelling (*downwelling*) (Gambar 8). Proses ini akan membuat lapisan permukaan memiliki cukup nutrisi yang dapat dimanfaatkan oleh fitoplankton (Chacko & Zimik, 2018; Lin *et al.*, 2003). Selain itu, faktor yang mempengaruhi respon air permukaan yang disebabkan oleh gaya atau gaya siklon adalah intensitas kecepatan siklon tropis. Intensitas kecepatan siklon secara signifikan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan laut untuk merespon dan durasi pengaruh siklon (Khaldun *et al.*, 2020).

Kecepatan dan intensitas siklon mempengaruhi pencampuran vertikal dan upwelling, yang dapat menginduksi lebih banyak nutrisi dari kolom air ke lapisan permukaan (Gambar 8d-8f). Nilai EPV maksimum tercatat pada tanggal 1 Desember pada pusat siklon mencapai 1,5x 10^{-5}m/s atau 1,296 m/hari. Peningkatan nutrisi akan berbanding lurus dengan peningkatan klorofil-a karena nutrisi dari kolom air yang naik ke permukaan akan memicu pertumbuhan fitoplankton dan meningkatkan konsentrasi klorofil-a. Lin (2012); Chacko & Zimik (2018) menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan konsentrasi klorofil-a dengan intensitas kecepatan siklon. Selain itu, di tempat yang sama, Efendi *et al.*, (2018) menunjukkan bahwa siklon Ernie yang masuk dalam kategori 4 menunjukkan peningkatan konsentrasi klorofil-a hingga 0,15 mg/m^3 di perairan selatan Jawa, namun siklon CD kategori 2 mampu meningkatkan konsentrasi klorofil-a hingga 0,1789 mg/m^3. Hal diduga karena pengaruh kedalaman klorofil maksimum pada suatu perairan yang berbeda-beda.

Kedalaman kolom air dan dinamika hidrodinamik lokal dapat mempengaruhi efektivitas siklon dalam meningkatkan konsentrasi klorofil-a. Penelitian oleh Moore *et al.*, (2008) menunjukkan bahwa kedalaman maksimum klorofil-a dan intensitas upwelling dapat bervariasi tergantung pada kondisi lokal seperti kedalaman perairan dan struktur termoklin. Dalam kasus siklon Ernie dan siklon CD, perbedaan dalam kedalaman klorofil maksimum dapat menjelaskan variasi dalam konsentrasi klorofil-a yang diamati, karena kedalaman ini mempengaruhi seberapa efisien nutrisi dari kedalaman yang lebih dalam dapat dipindahkan ke permukaan (Moore *et al.*, 2008). Selain itu, studi oleh Behrenfeld & Falkowski (1997) menegaskan bahwa upwelling yang lebih kuat, terkait dengan siklon intensitas tinggi, dapat mempercepat pertumbuhan fitoplankton melalui peningkatan ketersediaan nutrisi, tetapi hasil akhirnya juga dipengaruhi oleh kondisi lokal seperti stratifikasi termal dan kedalaman laut.

Analisis Hubungan Antar Variabel

Respon nilai SPL dan klorofil-a selama pembentukan siklon tropis menunjukkan hubungan yang kuat di sekitar jalur siklon tropis dengan nilai korelasi -0.823, hal ini menunjukkan bahwa ada hubungan berbanding terbalik antara SPL dan klorofil-a. Hasil analisis spasial temporal (Gambar 6 dan Gambar 7) menunjukkan bahwa di jalur siklon tropis, nilai SPL mengalami penurunan, dan konsentrasi klorofil-a meningkat khususnya pada saat siklon berada pada intensitas tinggi. Peningkatan (penurunan) nilai konsentrasi klorofil-a (SPL) akan



Gambar 9. Timeseries Variabilitas Kecepatan Angin, Arus, EPV, SPL dan Klorofil-a di Perairan Selatan Jawa. Kotak merah periode saat intensitas tertinggi siklon CD, abu-abu periode terjadinya siklon CD

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

sangat tergantung pada intensitas siklon tropis. Semakin tinggi intensitas siklon tropis akan terlihat perubahan yang signifikan pada setiap parameter. Perubahan ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan angin, yang merupakan faktor signifikan pada lapisan permukaan yang menginduksi proses pergerakan dengan lapisan bawah permukaan (Chacko & Zimik, 2018; Koropitan *et al.,* 2022; Yang *et al.,* 2020).

Analisis *timeseries* (Gambar 9) menunjukkan hubungan antar variabel, hubungan satu fase dan beda fase. Angin, arus dan EPV memperlihatkan hubungan satu fase atau waktu terjadinya bersamaan dengan peningkatan intensitas siklon tropis, sedangkan SPL dan klorofil-a berbeda fase. Perbedaan fase antara peningkatan intensitas siklon tropis dengan penurunan SPL dan klorofil-a sekitar 4 hari (Gambar 9). Perbedaan nilai fase antara SPL, klorofil-a dan intensitas siklon disebabkan oleh waktu yang dibutuhkan oleh massa air dingin dan nutrisi dari kolom air naik ke lapisan permukaan (Koropitan *et al.* 2022; Korty *et al.* 2008). Nutrisi tersebut selanjutnya dapat digunakan oleh fitoplankton untuk tumbuh dan menghasilkan klorofil-a. Hal ini diperkuat analisis EPV dan pergerakan suhu kolom perairan, yang menunjukkan kecepatan pergerakan massa air sebesar 1,296 m/hari dan membutuhkan ± 3-4 m hingga kepermukaan (Yang *et al.,* 2020). Analisis *timeseries* (Gambar 9) menunjukkan bahwa saat terjadinya siklon hingga siklon punah terjadi peningkatan klorofil-a hingga 2 minggu, hal ini menjadikan daerah yang dilalui oleh siklon CD memiliki produktifitas primer yang tinggi dan dapat dijadikan daerah penangkapan ikan (DPI) sementara (Koropitan *et al.,* 2022; I. Lin *et al.,* 2003).

KESIMPULAN

Respon lautan yang diakibatkan oleh siklon CD pada permukaan perairan menunjukkan peningkatan kecepatan angin angin hingga 7,67 m/s. Percepatan angin mengakibatkan kecepatan arus meningkat hingga maksimum 0,6791 m/s dengan pola vektor arus searah jarum jam yang menyebabkan divergensi. Secara fisis terjadi EPV yang megindikasikan terjadinya upwelling yang sehingga menyebabkan penurunan nilai SPL dengan perbedaan suhu sebesar 0,64°C sebelum siklon dan setelah siklon, peningkatan konsentrasi klorofil-a hingga 0,1789 mg/m^3 dan peningkatan kedalaman MLD hingga 24,69 m. Hal ini ditemukan pada daerah yang dilalui oleh siklon tropis dengan intensitas tertinggi. Perbedaan fase antara kejadian siklon tropis dengan penurunan SPL sekitar dan peningkatan klorofil-a sekitar 4 hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *Australian Bureau of Meteorology* (BOM), *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO) Australia dan *Copernicus Marine service* yang telah memfasilitasi keterbukaan akses terhadap data yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Behrenfeld, M. J. & Falkowski, P. G. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1): 1-15. https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001.

Chacko, N. & Zimik, L. 2018. Effect of cyclone thane in the bay of bengal explored using moored buoy observations and multi-platform satellite data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(5): 821–828. https://doi.org/10.1007/s12524-017-0748-9.

Domingues, R., Goni, G., Bringas, F., Lee, S., Kim, H., Halliwell, G., Dong, J., Morell, J. & Pomales, L. 2015. Upper ocean response to Hurricane Gonzalo (2014): Salinity effects revealed by targeted and sustained underwater glider observations. *Geophysical Research Letters*, 42: 7131–7138. https://doi.org/10.1002/2015GL065378.

Donlon, C.J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E. & Wimmer, W. 2012. The Operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. Remote Sensing Environment, 116:140–158

Efendi, U., Fadlan, A. & Hidayat, A. M. 2018. Chlorophyll-A variability in the southern coast of Java Island, Indian Ocean: Corresponding to the tropical cyclone of Ernie. *1st International Conference on Maritime Sciences and Advanced Technology "Ocean Science and Technology Toward a Global Maritime Axis,* Bali, Indonesia. 3–5 August 2017.

Emanuel, K. 2001. Contribution of tropical cyclones to meridional heat transport by the oceans. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *106*(D14): 14771–14781. https://doi.org/10.1029/2000JD900641.

Emery, W. J. & Thomson, R. E. 1998. Data analysis methods in physical oceanography. In *Data analysis*

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

methods in physical oceanography. BPC Weatons. https://doi.org/10.2307/1353059.

Fitrianah, D., Hidayanto, A. N., Gaol, J. L., Fahmi, H. & Arymurthy, A. M. 2016. A Spatio-Temporal Data-Mining Approach for Identification of Potential Fishing Zones Based on Oceanographic Characteristics in the Eastern Indian Ocean. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *9*(8): 3720–3728. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2492982.

Ginanjar, S., Syach, M. F. & Wulandari, S. 2020. Kajian pengaruh siklon tropis mangga terhadap curah hujan, transpor Ekman, viskositas Eddy dan tinggi gelombang di perairan selatan Jawa pada 20-25 Mei 2020. *Jurnal Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*, 7(2): 15–23.

Grande, M., Murua, H., Granado, I., Taconet, M., Kroodsma, D., Miller, A. & Fernandes, J. A. 2019. AIS-based fishing activity in the Eastern Indian Ocean. In *Global Atlas of AIS-based fishing activity - Challenges and opportunities* (Taconet, M, pp. 1–276). FAO.

Guinehut, S., Dhomps, A.L., Larnicol, G. & Le Traon, P. Y. 2012. High resolution 3-d temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. Ocean Sci., 8: 845–857

Hao, J., Chen, Y., Wang, F. & Lin, P. 2012. Seasonal thermocline in the China Seas and northwestern Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(2): 1–14. https://doi.org/10.1029/2011JC007246.

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. https://doi.org/10.31172/jmg.v18i1.348.

Ismoyo, D. O., & Putri, M. R. 2014. Identifikasi Awal Eddies di Perairan Laut Jawa. *Jurnal Oseanologi Indonesia*, 1(1): 12–20.

Khaldun, M. H. I., Naulita, Y. & Koropitan, A. F. 2020. Percampuran Turbulen Di Tenggara Samudera Hindia Saat Siklon Tropis Marcus Menggunakan Data ARGO Float. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, *6*(2): 293-300. https://doi.org/10.24843/jmas.2020. v06.i02.p17.

Koropitan, A. F., Khaldun, M. H. I. & Naulita, Y. 2022. Impact of tropical Cyclone Marcus on ocean subsurface and surface layers. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *8*(3): 353–368. https://doi.org/10.22034/gjesm.2022.03.05.

Korty, R. L., Emanuel, K. A. & Scott, J. R. 2008. Tropical cyclone-induced upper-ocean mixing and climate: Application to equable climates. *Journal of Climate*, *21*(4): 638–654. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1659.1.

Lin, I. I. 2012. Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North Pacific subtropical ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(3). https://doi.org/10.1029/2011JC007626.

Lin, I., Liu, W. T., Wu, C. C., Wong, G. T. F., Hu, C., Chen, Z., Liang, W. Der, Yang, Y. & Liu, K. K. 2003. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone. *Geophysical Research Letters*, 30(13): 10–13. https://doi.org/10.1029/ 2003GL017141.

Lumban-Gaol, J., Leben, R. R., Vignudelli, S., Mahapatra, K., Okada, Y., Nababan, B., Mei-Ling, M., Amri, K., Arhatin, R. E. & Syahdan, M. 2015. Variability of satellite-derived sea surface height anomaly, and its relationship with Bigeye tuna (Thunnus obesus) catch in the Eastern Indian Ocean. *European Journal of Remote Sensing*, *48*: 465–477. https://doi.org/10.5721/EuJRS20154826.

Mann, K. H., & Lazier, J. R. N. 2006. *Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans*. Blackwell Publishing.

Moore, J. K., Abbott, M. R. & Thomas, C. S. 2008. Phytoplankton in the Southern Ocean: A comparison of a predictive model and satellite observations. *Journal of Marine Systems*, 74(3-4): 111-132.

Mrvaljevic, R. K., Black, P. G., Centurioni, L. R., Chang, Y. T., D'Asaro, E. A., Jayne, S. R., Lee, C. M., Lien, R. C., Lin, I. I., Morzel, J., Niiler, P. P., Rainville, L. & Sanford, T. B. 2013. Observations of the cold wake of Typhoon Fanapi (2010). *Geophysical Research Letters*, 40(2): 316–321. https://doi.org/10.1029/2012GL054282.

Mulet, S., Rio, M.H., Mignot, A., Guinehut, S. & Morrow, R. 2012. A new estimate of the global 3d geostrophic ocean circulation based on satellite data and in-situ measurements. *Deep Sea Research. Part II*, 77–80: 70-81. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.012.

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. https://doi.org/10.46824/megasains.v11i2.8

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025

Rio, M.H., Mulet, S. & Picot, N. 2014. Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophysal Research Letter*, 41: 8918–8925

Sandery, P. A., Brassington, G. B., Craig, A. & Pugh, T. 2010. Impacts of ocean-atmosphere coupling on tropical cyclone intensity change and ocean prediction in the Australian region. *Monthly Weather Review*, *138*(6): 2074–2091. https://doi.org/10.1175/2010MWR3101.1.

Setiawan, R. Y., Susanto, R. D., Horii, T., Alifdini, I., Siswanto, E., Sari, Q. W., Wirasatriya, A. & Aryudiawan, C. 2024. The Fujiwhara effect on ocean biophysical variables in the southeastern tropical Indian Ocean region. *Journal of Marine Systems*, *245*(103990). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2024.103990.

Stewart, R. H. 2008. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A&M University.

Suhardi, B., Adiputra, A. & Reeva Avrian. 2020. Kajian Dampak Cuaca Ekstrem Saat Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia di Wilayah Jawa Barat. *Jurnal Geografi, Edukasi Dan Lingkungan (JGEL)*, *4*(2): 61–67. https://doi.org/10.29405/jgel.v4i2.4354.

Syaifullah, M. D. 2015. Siklon Tropis, Karasteristik Dan Pengaruhnya Di Wilayah Indonesia Pada Tahun 2012. *Jurnal Sains Dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, *16*(2): 61–71. http://dx.doi.org/10.29122/jstmc.v16i2.1048.

Tomczak, M. & Godfrey, J. S. 2003. *Regional Oceanography: An Introduction*. Elsevier.

Triyono, Arifin, T., Nugroho, D., Novianto, D., Rahmawati, H., Amri, S., Faizah, R., Prihatiningsih, Nurfiarini, A. & Purnomo, A. 2019. *Potensi Sumberdaya Kelautan dan Perikanan WPPNRI 573*. Amafrad Press.

Windupranata, W., A.D.S. Nusantara, C., D. Wijaya, D. & Prijatna, K. 2019. Impact Analysis of Tropical Cyclone Cempaka-Dahlia on Wave Heights in Indonesian Waters from Numerical Model and Altimetry Satellite. *KnE Engineering*, 203–214. https://doi.org/10.18502 /keg.v4i3.5851.

Yan, Y., Li, L., & Wang, C. 2017. The effects of oceanic barrier layer on the upper ocean response to tropical cyclones. *Journal of Geophysical Research Ocean*, *122*: 4829–4844. https://doi.org/ 10.1038/175238c0

Yang, Y., Liu, L., Li, K., Yu, W., & Wang, H. 2020. Diurnal Sea surface temperature response to tropical cyclone Dahlia in the Eastern tropical Indian Ocean in 2017 revealed by the Bailong buoy. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *92*, 101163. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce. 2020.101163.

Diterima/Received : 06-02-2025
Disetujui/Accepted : 15-02-2025