

# Analisis Variabilitas Klorofil-a dan Suhu Permukaan Laut pada saat Kejadian Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya

Boby Christian Sinaga<sup>1\*</sup>, Anindya Wirasatriya<sup>2</sup>, Muhammad Helmi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Departemen Oseanografi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

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

Email: bobychristiansinaga@students.undip.ac.id

## Abstrak

Siklon Tropis Lili terjadi mulai tanggal 27 April hingga 30 April 2017, merupakan siklon yang melintasi Laut Timor. Analisis siklon tropis Lili terhadap parameter klorofil-a dan suhu permukaan laut (SPL) dilakukan dengan data penginderaan jauh. Dataset yang digunakan termasuk *Copernicus Glob-Colour* untuk klorofil-a dan *Optimally Interpolated Sea Surface Temperature* (OISST) untuk SPL. Data angin dari *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) juga digunakan untuk melihat pola angin dan *Ekman Pumping Velocity* (EPV) sebagai parameter siklon tropis. Data dianalisis secara spasial dan temporal untuk setiap parameter. Analisis korelasi dilakukan selama fase pembentukan, puncak, dan peluruhan Siklon Tropis Lili, dengan fokus pada Laut Timor dan wilayah dengan kecepatan angin maksimum. Hasil menunjukkan bahwa Siklon Tropis Lili menurunkan SPL antara 0,5°C hingga 1°C dan meningkatkan klorofil-a antara 0,5 mg/mm<sup>3</sup> hingga 1,5 mg/mm<sup>3</sup> di Laut Timor. EPV negatif menyebabkan upwelling, menurunkan SST dan meningkatkan klorofil-a. Selain itu, angin kencang meningkatkan pelepasan panas laten dan penguapan, yang juga memengaruhi penurunan SPL.

**Kata kunci :** Siklon Tropis Lili, Klorofil-a, Suhu Permukaan Laut, Angin, Ekman Pumping Velocity

## Abstract

### *Analysis of Chlorophyll-a Variability and Sea Surface Temperature during Tropical Cyclone Lili in the Timor Sea and Surrounding Areas*

*Tropical Cyclone Lili occurred from April 27 to 30 April 2017, passing through the Timor Sea. Remote sensing data were used to analyze the variability of chlorophyll-a concentration and sea surface temperature (SST). The datasets included Copernicus Glob-Colour for chlorophyll-a and Optimally Interpolated Sea Surface Temperature (OISST) for SST. Wind data from the Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) were also used to observe wind pattern and Ekman pumping velocity (EPV) as parameters of tropical cyclones. The data were analyzed spatially and temporally, for each parameter. Correlation analysis was performed during the formation, peak, and decay phases of Tropical Cyclone Lili, focusing on the Timor Sea and the region with maximum wind speed. Results showed that Tropical Cyclone Lili reduced SST around 0,5°C to 1°C and increased chlorophyll-a around 0,5 mg/mm<sup>3</sup> to 1,5 mg/mm<sup>3</sup> in the Timor Sea. The negative EPV induced upwelling, reducing SST and increasing chlorophyll-a. Additionally, strong winds enhanced latent heat release and evaporation, further reducing SST.*

**Keywords :** Tropical Cyclone Lili, Chlorophyll-a, Sea Surface Temperature, Wind, Ekman Pumping Velocity

## PENDAHULUAN

Laut Timor merupakan perairan yang memiliki potensi ikan yang tinggi dan berada di daerah Intertropical Convergence Zone atau ITCZ (Amir *et al.*, 2021; Nemoto *et al.*, 2024). ITCZ dapat memengaruhi frekuensi terjadinya siklon

tropis (Burnett *et al.*, 2021). Berdasarkan data historis yang dihimpun dari situs Badan Penyelajah Antariksa Jepang (JAXA) di Laut Timor telah terjadi siklon tropis Lili mulai tanggal 9 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019. Siklon tropis Lili mulai terbentuk di Laut Banda dan melintas di Laut

Timor dengan intensitas kecepatan angin lebih dari 35 knots atau 18 m/s (Sadarang, 2022). Sebelum terjadi siklon tropis Lili, terjadi dua siklon tropis yaitu siklon tropis Frances pada tahun 2017 dan siklon tropis Marcus pada tahun 2018 (Koropitan *et al.*, 2022 & Rachim *et al.*, 2021). Siklon tropis merupakan fenomena cuaca yang tumbuh di atas perairan hangat dengan wilayah perawanan konvektif dengan kecepatan angin tinggi yang dapat menimbulkan kerusakan terutama pada daerah yang dilaluinya (Suardi *et al.*, 2020). Endriani dan Fauziah (2020) menjelaskan bahwa terdapat beberapa kondisi atmosfer yang dapat mendukung terjadinya siklon tropis seperti kelembaban udara yang cukup lembab, vortisitas yang kuat yang terdapat pada lintang. Dampak yang ditimbulkan oleh siklon tropis yang tumbuh di dekat wilayah Indonesia dapat memengaruhi kondisi cuaca di Indonesia (Fitri *et al.*, 2022).

Analisis siklon tropis Flamboyan yang terjadi di Samudera Hindia Barat Daya pada tanggal 28 April 2018 hingga 3 Mei 2018 mengakibatkan peningkatan konsentrasi klorofil-a sekitar 0,05 hingga 0,1 mg/m<sup>3</sup> (Wirasatriya & Kunarso, 2024). Siklon tropis lainnya yang juga terjadi di perairan sekitar Australia yaitu siklon tropis Cempaka yang terjadi mulai tanggal 27 November 2017 juga memengaruhi variabilitas konsentrasi klorofil-a di perairan Selatan Jawa. Selama periode pembentukan, kejadian dan peleburan dari siklon tropis Cempaka diketahui bahwa konsentrasi klorofil-a sebelum, saat berfluktuatif (Sagala dan Saragih, 2021). Hal tersebut dipicu akibat terjadinya *upwelling* yang memengaruhi pengangkatan klorofil-a ke permukaan laut (Nurafifah *et al.*, 2022).

Siklon tropis memengaruhi parameter laut seperti suhu permukaan laut dan klorofil-a. Variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a secara fluktuatif pada saat fase pertumbuhan, kejadian, dan meleburnya siklon tropis (Sagala dan Saragih, 2021). Khadami dan Purnaningtyas (2021) menyatakan bahwa terdapat peningkatan intensitas *upwelling* siklon tropis Seroja yang ditandai dengan adanya peningkatan klorofil-a, penurunan suhu permukaan laut, pada pusat siklon tropis tersebut. Variabilitas suhu permukaan laut pada daerah tropis variasi tahunannya kecil kurang dari 20C dan hangat. Trisianto *et al.* (2021) menemukan bahwa adanya korelasi yang kuat antara *upwelling* dan suhu permukaan laut serta *upwelling* dan klorofil-a. Intensitas *upwelling* diindikasikan oleh nilai Ekman pumping velocity

(EPV). Nilai EPV dipengaruhi oleh siklon tropis (Lu *et al.*, 2020). Siklon tropis Lili juga dapat berdampak terhadap kondisi cuaca ekstrim. Siklon tropis Mangga memberikan dampak yang terjadi secara tidak langsung yaitu angin kencang yang terjadi saat fase pertumbuhan siklon tropis atau fase depresi (Ninggar dan Siregar, 2020). Angin kencang yang terkait dengan siklon tropis Seroja menjadi faktor utama dalam menggerakkan produksi klorofil-a fitoplankton dan pendinginan suhu permukaan laut di Laut Sawu melalui proses *upwelling* dan pencampuran (mixing) kolom air (Setiawan *et al.*, 2021).

Siklon tropis merupakan fenomena cuaca skala regional yang memengaruhi variabilitas klorofil-a, suhu permukaan laut, angin, dan *Ekman pumping velocity*. Variabilitas parameter kesuburan kelautan mendapat pengaruh oleh siklon tropis pada saat fase pembentukan, fase puncak, dan pada saat fase peluruhan siklon tropis. *Ekman pumping velocity* dan angin merupakan parameter yang berperan sebagai mekanisme utama yang menyebabkan variabilitas suhu permukaan laut, klorofil-a selama fase pembentukan, fase puncak, dan fase peluruhan siklon tropis. Penelitian ini bertujuan mengkaji secara spasial dan temporal kondisi klimatologi variabilitas konsentrasi klorofil-a, suhu permukaan laut, angin, dan *Ekman pumping velocity* di Laut Timor dan sekitarnya selama tahun 2008 hingga 2021.

## MATERI DAN METODE

Kami menganalisis data pada saat fase pembentukan, kejadian, dan peluruhan siklon tropis Lili yaitu tanggal 2 Mei hingga 18 Mei 2019. Penelitian ini berfokus pada lokasi penelitian di Laut Timor dan sekitarnya dengan koordinat 10<sup>0</sup> sampai 15<sup>0</sup> LS dan 125<sup>0</sup> sampai 130<sup>0</sup> BT yang kemudian difokuskan di Laut Timor dengan koordinat 10<sup>0</sup> sampai 13<sup>0</sup> LS dan 126<sup>0</sup> sampai 129<sup>0</sup> BT seperti pada gambar 1. Selain itu, kami juga menganalisis wilayah dengan kecepatan angin maksimum pada tanggal 9 Mei 2019 yang ditunjukkan dengan kotak merah di gambar 3. Lokasi Laut Timor dan wilayah angin maksimum diperlukan untuk penghitungan korelasi antar parameter.

## Alat dan Data Penelitian

Data-data yang diunduh dari masing-masing situs diperlukan untuk proses pengolahan data yang kemudian akan divisualisasikan menggunakan *software* yang tersedia. Data

klorofil-a yang berasal dari *Copernicus Glob-Colour* yang diunduh dari situs *Marine Copernicus* merupakan data dengan format *Net Common Data File (.nc)* dengan level 4 dan resolusi  $0,04^0 \times 0,04^0$ . Data tersebut juga telah divalidasi dengan pengamatan in situ yang meningkatkan akurasi dalam mengukur konsentrasi klorofil-a di muka laut (Prallal *et al.*, 2023). Data suhu permukaan laut yang digunakan merupakan data *Optimally Interploated Sea Surface Temperature (OISST)*. Data tersebut dapat merepresentasikan suhu permukaan laut dengan akurat (Zhu *et al.*, 2022). Data angin yang digunakan pada penelitian ini merupakan data *Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP)* yang merupakan data angin permukaan yang diperoleh dari berbagai sensor satelit gelombang mikro. Data tersebut memiliki resolusi spasial  $0,25^0 \times 0,25^0$  (Munandar *et al.*, 2021). Data *Ekman pumping velocity* dihitung dari data angin permukaan CCMP melalui persamaan:

$$EPV = -\frac{curl}{\rho_w f}$$

$\rho_w$  bernilai  $1,025 \text{ kg/m}^3$  yang merupakan densitas air laut, curl merupakan curl dari tekanan angin dan

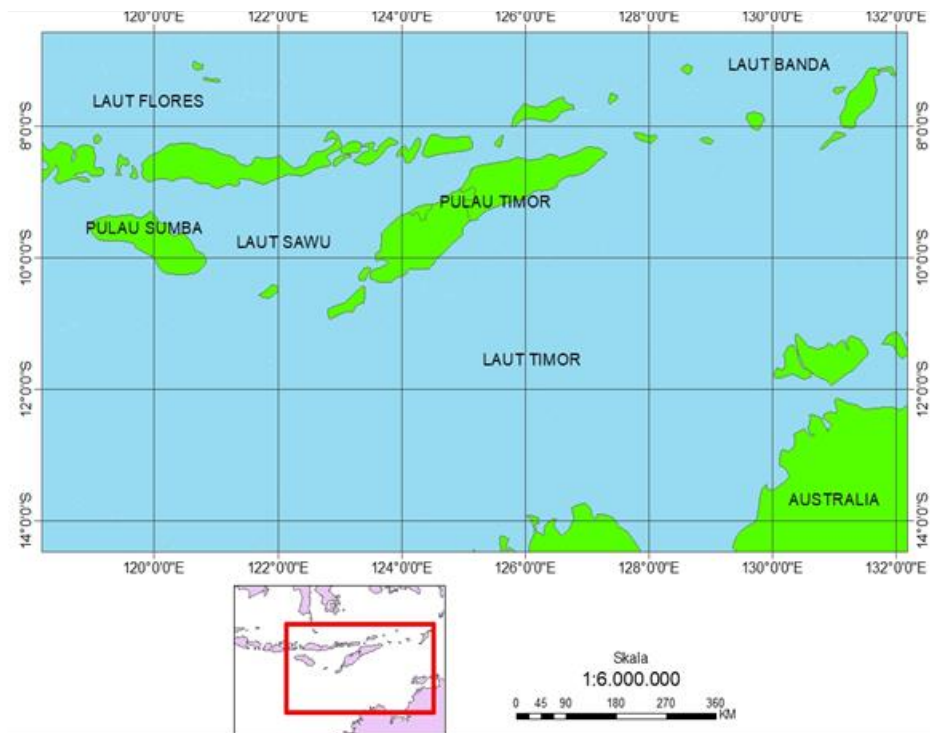
$f$  merupakan parameter *Coriolis* (Wirasatriya *et al.*, 2020).

### Analisis Spasial

Analisis spasial merupakan metode analisis untuk memahami hubungan suatu objek yang berada di dalam ruangan. Data citra satelit yang telah diolah kemudian divisualisasikan ke dalam bentuk peta. Analisis spasial dilakukan untuk melihat pola persebaran dari klorofil-a, suhu permukaan laut, angin, dan EPV di Laut Timor dan sekitarnya. Analisis harian akan dilakukan terhadap parameter klorofil-a, suhu permukaan laut, angin, dan EPV. Analisis bertujuan untuk mengetahui variabilitas parameter yang diteliti melalui sebaran nilai yang tersaji dalam gradien warna.

### Analisis Temporal

Analisis temporal adalah suatu metode analisis data yang digunakan untuk mempelajari dan memahami perubahan atau tren dalam data seiring waktu. Data yang diambil dari waktu ke waktu kemudian dianalisis dan diinterpretasikan untuk mengidentifikasi pola atau tren dalam data tersebut untuk memprediksi perilaku masa



Gambar 1. Lokasi Penelitian

depan dari suatu fenomena atau sistem yang diamati. Analisis temporal dalam penelitian ini dilakukan terhadap variabilitas harian klorofil-a, suhu permukaan laut, angin, dan EPV di Laut Timor dan sekitarnya pada saat kejadian siklon tropis pada fase pembentukan, kejadian, dan peluruhan dari siklon tropis Lili. Fase pembentukan dimulai pada tanggal 2 Mei 2019 hingga 8 Mei 2019, fase puncak dimulai pada tanggal 9 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019, dan fase peluruhan dimulai pada tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019.

**Analisis Korelasi**

Analisis korelasi adalah metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara suhu permukaan laut dan klorofil-a terhadap angin dan EPV untuk mengetahui seberapa besar hubungannya. Penentuan korelasi dilakukan di dua lokasi yaitu di Laut Timor dan wilayah angin maksimum. Rumus yang digunakan untuk menentukan korelasi adalah sebagai berikut (Rosalina *et al.*, 2023):

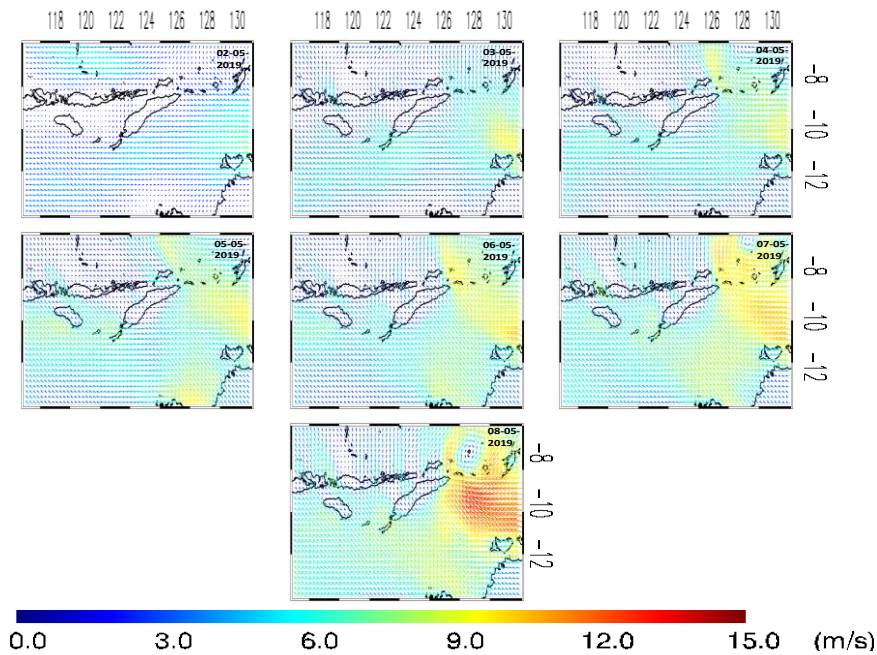
$$r_{xy} = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Berdasarkan rumus tersebut, n adalah jumlah sampel dan X,Y merupakan variabel

tingkat produktivitas kealutan yang akan dikorelasikan. Dalam analisis korelasi juga diterapkan konsep *lag* dan *lead* masing-masing sebanyak lima hari, hal tersebut dilakukan karena terdapat waktu respon yang diperlukan oleh beberapa parameter.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

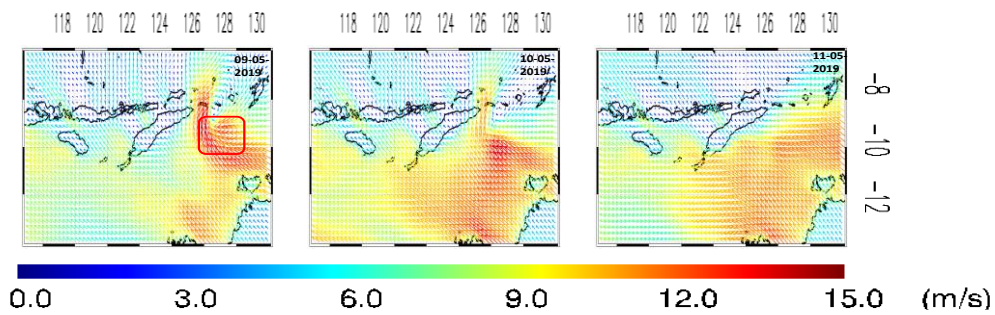
Gambar 2 merupakan visualisasi harian arah kecepatan angin tujuh hari sebelum terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan arah kecepatan angin mulai tanggal 2 Mei 2019 hingga 8 Mei 2019. Terlihat bahwa pada tanggal 2 Mei 2019 nilai kecepatan angin di Laut Timor dan sekitarnya mencapai 7 m/s yang bertiup dari arah timur menuju ke barat. Nilai kecepatan angin meningkat mulai tanggal 3 Mei 2019 hingga 5 Mei 2019 dengan kecepatan angin maksimal 9 m/s yang bertiup dari timur ke barat dan sebagian ke utara. Berdasarkan gambar terlihat pada tanggal 6 Mei 2019 telah terbentuk pola angin siklonal di Laut Banda yang bergerak ke arah barat daya menuju Laut Timor hingga tanggal 8 Mei 2019. Kecepatan angin pada tanggal 6 Mei 2019 dan 7 Mei 2019 meningkat hingga 10 m/s, kemudian pada tanggal 8 Mei 2019 meningkat hingga 12 m/s.



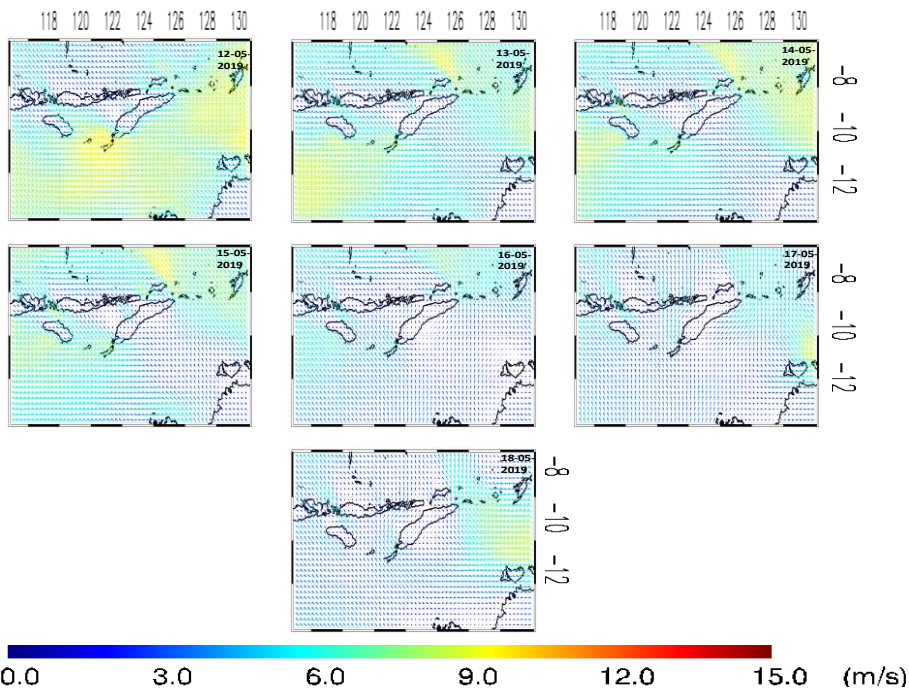
**Gambar 2.** Visualisasi Arah Kecepatan Angin pada Fase Pembentukan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya

Gambar 3 merupakan visualisasi arah dan kecepatan angin mulai tanggal 9 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019 yang merupakan tanggal berlangsungnya siklon tropis Lili. Terlihat bahwa pola siklonal yang disebabkan siklon tropis Lili berlangsung pada tanggal 9 Mei 2019 dan 10 Mei 2019 yang berakhir pada puncak masa hidupnya pada tanggal 11 Mei 2019. Siklon Lili bergerak menuju arah barat daya di Laut Timor. Nilai kecepatan angin selama siklon tropis Lili berlangsung di Laut Timor hingga 14 m/s. Arah pola siklonal dari siklon tropis Lili juga terlihat searah jarum jam karena siklon tersebut terjadi di bumi belahan selatan (*Yang et al.*, 2020).

Gambar 4 merupakan visualisasi harian arah kecepatan angin tujuh hari setelah terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan arah kecepatan angin mulai tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019. Terlihat bahwa mulai tanggal 12 Mei 2019 hingga 15 Mei 2019 nilai kecepatan angin di Laut Timor dan sekitarnya mulai menurun dengan kecepatan maksimal 9 m/s yang bertiup dari arah tenggara menuju ke barat laut. Nilai kecepatan angin semakin menurun mulai tanggal 16 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 dengan nilai kecepatan angin maksimal 7 m/s dengan kecenderungan arah tiupan dari tenggara menuju barat laut.



**Gambar 3.** Visualisasi Arah Kecepatan Angin pada saat Kejadian Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya. Kotak merah menggambarkan lokasi dan waktu kejadian puncak siklon Lili



**Gambar 4.** Visualisasi Arah Kecepatan Angin pada Fase Peluruhan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya

**Ekman Pumping Velocity**

Gambar 5 merupakan visualisasi harian EPV pada masa pembentukan. Terlihat bahwa pada tanggal 08 Maret 2018 hingga 14 Maret 2018 variabilitas EPV di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara  $-1,5 \times 10^{-5}$  m/s hingga  $1,5 \times 10^{-5}$  m/s. Terlihat bahwa mulai tanggal 03 Mei 2019 terlihat pola *upwelling* dan *downwelling* yang berbentuk siklonik yang menandakan mulai terjadinya siklon tropis Lili yang mulai bergerak dari Laut Banda. Pola *upwelling* ditandai dengan nilai EPV yang negatif sementara *downwelling* bernilai sebaliknya (Bernades, 2021).

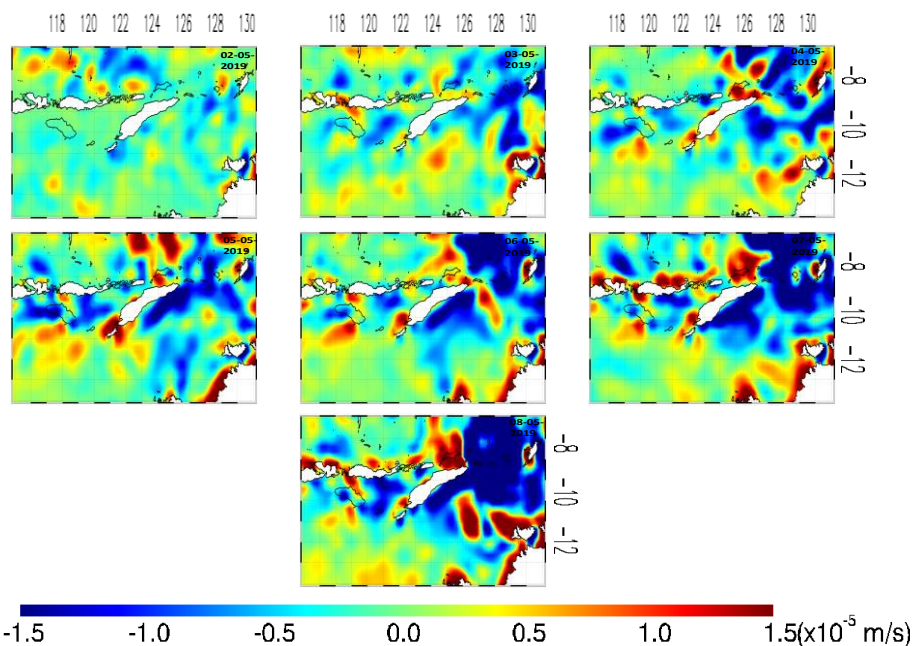
Gambar 6 merupakan visualisasi harian EPV pada saat terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan EPV mulai tanggal 09 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019. Terlihat bahwa pada tanggal 09 Mei 2019 variabilitas EPV di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara  $-1,5 \times 10^{-5}$  m/s hingga  $1,5 \times 10^{-5}$  m/s. EPV negatif ditemukan di pusat siklon menandakan adanya *upwelling* kuat di daerah tersebut. Pola variabilitas tersebut mulai mengalami penurunan mulai tanggal 11 Mei 2019. Terlihat juga pada gambar tersebut bahwa mulai tanggal 09 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019 terlihat pola *upwelling* dan *downwelling* yang berbentuk siklonik bergerak ke arah barat daya dan berangsur mengalami penurunan variabilitas.

Gambar 7 merupakan visualisasi harian EPV tujuh hari setelah terjadinya siklon tropis Frances. Visualisasi tersebut menampilkan

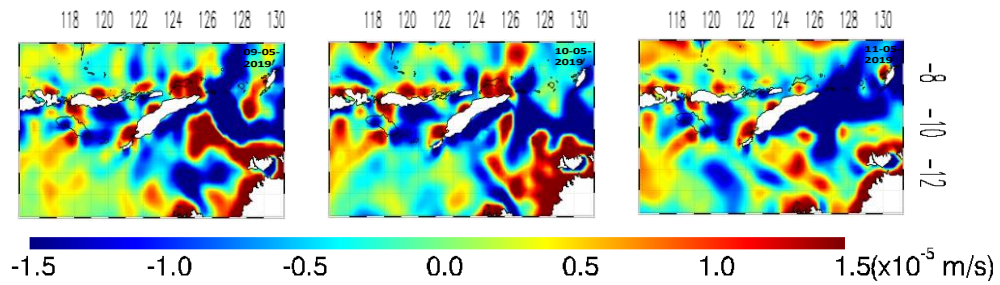
EPV mulai tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019. Terlihat bahwa pada tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 variabilitas EPV di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara  $-1,5 \times 10^{-5}$  m/s hingga  $1,5 \times 10^{-5}$  m/s. Terlihat juga pada gambar tersebut bahwa selama masa peluruhan, variabilitas *downwelling* masih cukup luas persebarannya terutama di Laut Timor pada tanggal 12 Mei 2019. Pola *upwelling* dan *downwelling* yang berbentuk siklonik mulai menghilang dan kembali normal mulai tanggal 13 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019.

**Suhu Permukaan Laut**

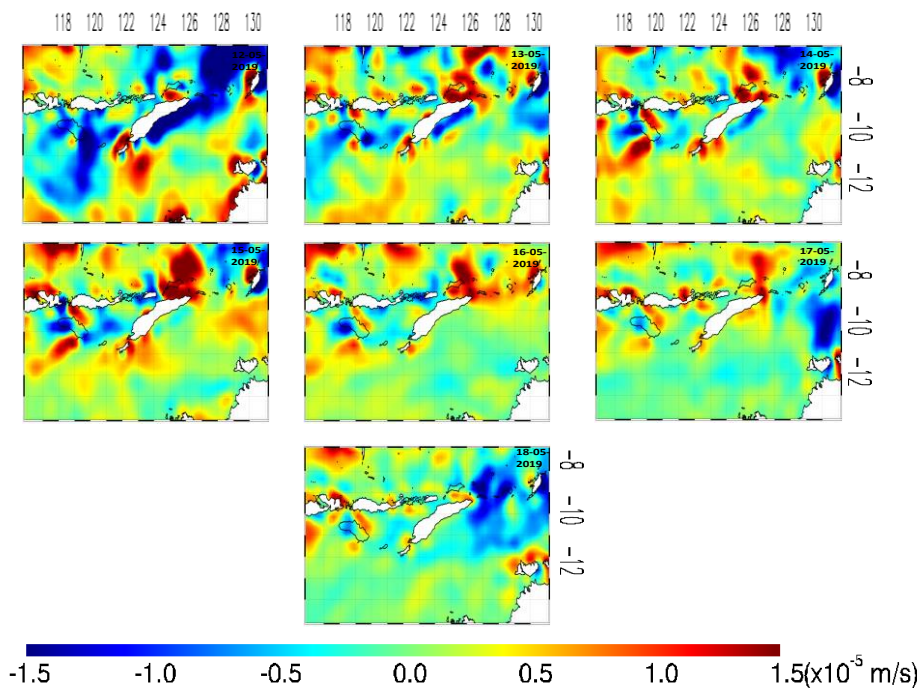
Gambar 8 merupakan visualisasi harian suhu permukaan laut pada masa pembentukan siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan suhu permukaan laut mulai tanggal 2 Mei 2019 hingga 8 Mei 2019 di Laut Timor dan sekitarnya. Terlihat bahwa mulai dari tanggal 2 Mei 2019 hingga tanggal 6 Mei 2019 variabilitas suhu permukaan laut mengalami kenaikan. Tanggal 6 Mei 2019 merupakan variabilitas suhu permukaan laut tertinggi dengan nilai antara 27 hingga 27 °C hingga 31°C dengan variabilitas tertinggi terdapat di Laut Flores. Menurut Ma *et al.* (2024), suhu permukaan laut yang hangat merupakan faktor utama yang membentuk siklon tropis. Kemudian mulai tanggal 7 Mei 2019 hingga 8 Mei 2019 variabilitas suhu permukaan laut berangsur mengalami penurunan.



**Gambar 5.** Visualisasi Ekman Pumping Velocity pada Fase Pembentukan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



**Gambar 6.** Visualisasi Ekman Pumping Velocity pada saat Kejadian Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



**Gambar 7.** Visualisasi Ekman Pumping Velocity pada Fase Peluruhan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya

Gambar 9 merupakan visualisasi harian suhu permukaan laut pada saat terjadinya siklon tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya yang berlangsung pada tanggal 9 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019. Terlihat mulai dari tanggal 9 Mei 2019 hingga tanggal 11 Mei 2019 variabilitas suhu permukaan laut berangsur mengalami penurunan dengan kisaran nilai suhu permukaan laut antara 27<sup>o</sup>C hingga 30<sup>o</sup>C. Penurunan suhu muka laut atau SST *cooling* pada umumnya disebabkan oleh pencampuran vertikal (Ruan *et al.*, 2024). Penurunan variabilitas nilai suhu permukaan laut yang terjadi antara 0,5<sup>o</sup>C hingga 1<sup>o</sup>C.

Gambar 10 merupakan visualisasi harian suhu permukaan laut tujuh hari setelah terjadinya

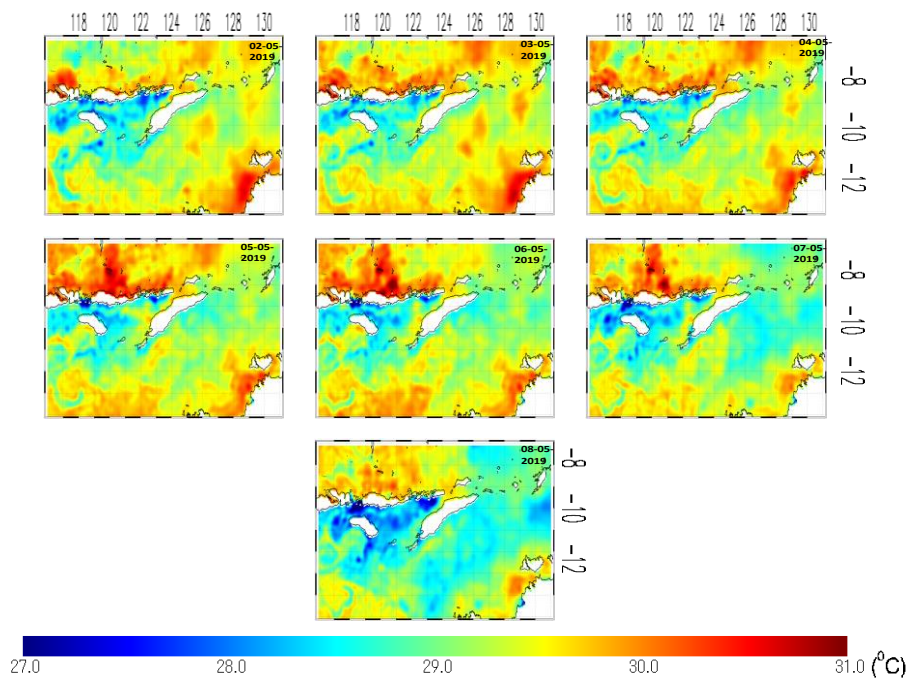
siklon tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya. Visualisasi tersebut menampilkan suhu permukaan laut mulai tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 yang memiliki nilai suhu permukaan laut antara 27<sup>o</sup>C hingga 30<sup>o</sup>C. Terlihat bahwa tujuh hari setelah kejadian siklon tropis Lili variabilitas suhu permukaan laut di Laut Timor dan sekitarnya terutama di Laut Timor yang merupakan lintasan siklon tropis Lili berangsur mengalami kenaikan.

Gambar 11 menunjukkan grafik antara kecepatan angin harian, EPV harian, dan suhu permukaan laut harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peluruhan dari siklon tropis Lili selama tanggal 2 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di Laut Timor. Berdasarkan grafik

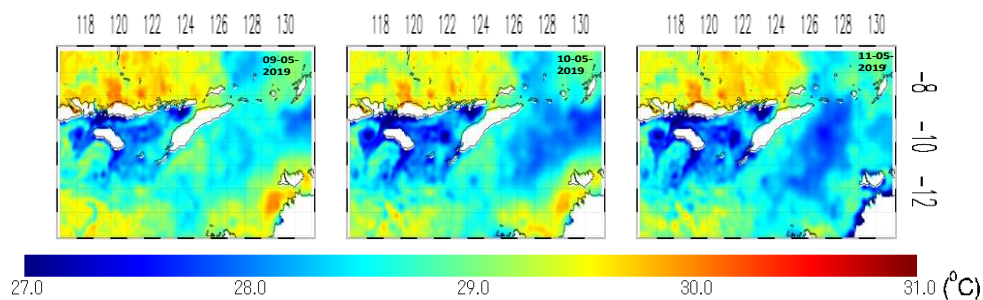
tersebut diketahui bahwa kecepatan angin berangsur naik mulai tanggal 2 Mei 2019 dan mencapai puncaknya pada tanggal 10 Mei 2019 dengan kecepatan 12 m/s. Parameter EPV menunjukkan bahwa nilainya mengalami fluktuasi dimana penurunan nilai EPV secara signifikan terjadi pada tanggal 5 Mei 2019 dan 11 Mei 2019. Sementara untuk suhu permukaan laut menunjukkan bahwa nilainya mengalami penurunan dan mencapai nilai terendahnya pada tanggal 11 Mei 2019 dengan nilai 28,4°C.

Gambar 12 menunjukkan grafik antara kecepatan angin harian, EPV harian, dan suhu permukaan laut harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peluruhan dari siklon

tropis Lili di wilayah dengan intensitas angin maksimum. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa kecepatan angin berangsur naik mulai tanggal 2 Mei 2019 dan mencapai puncaknya pada tanggal 10 Mei 2019 dengan kecepatan 12 m/s. Parameter EPV menunjukkan bahwa nilainya mengalami penurunan secara signifikan mulai tanggal 7 Mei 2019 dan mencapai titik terendah pada tanggal 10 Mei 2019, kemudian mulai naik kembali pada tanggal 11 Mei 2019 dan kembali ke kondisi normal. Sementara untuk suhu permukaan laut menunjukkan bahwa nilainya mengalami penurunan dan mencapai nilai terendahnya pada tanggal 11 Mei 2019 dengan nilai 27,7°C.

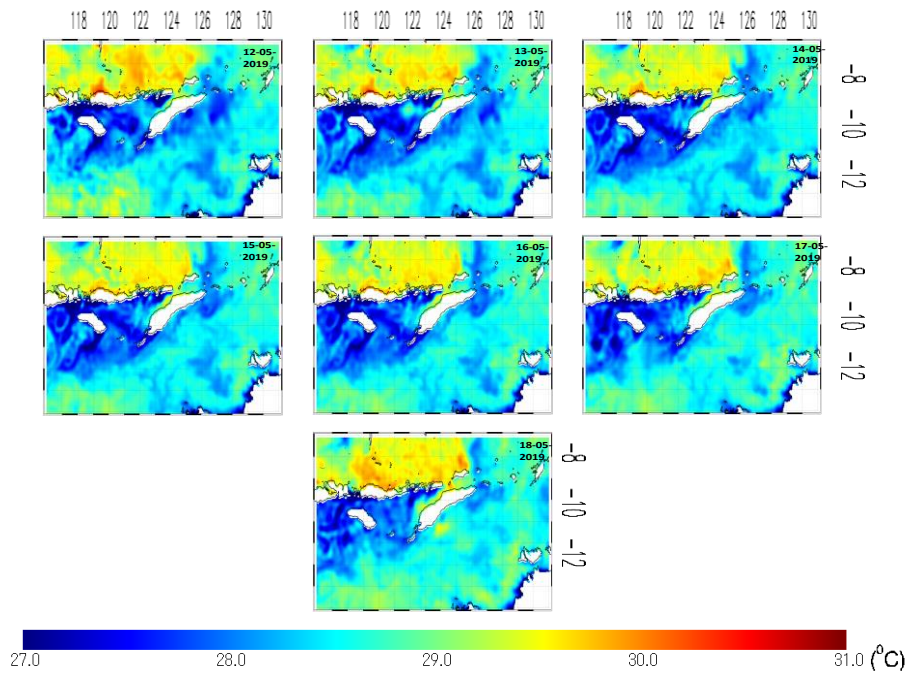


**Gambar 8.** Visualisasi Suhu Permukaan Laut pada Fase Pembentukan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya

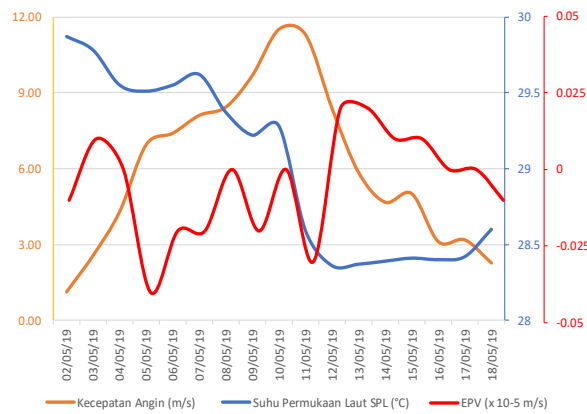


**Gambar 9.** Visualisasi Suhu Permukaan Laut pada saat Kejadian Siklon Tropis Lilidi Laut Timor dan sekitarnya

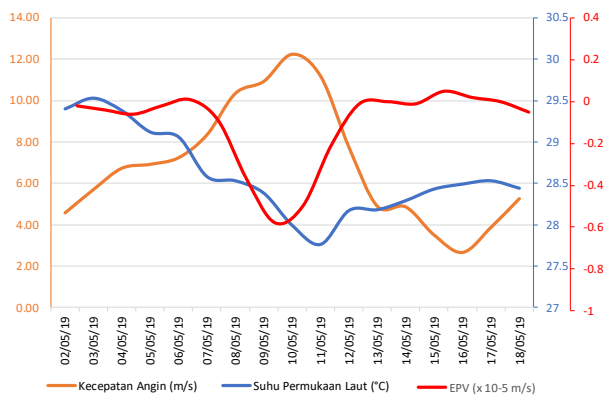




**Gambar 10.** Visualisasi Suhu Permukaan Laut pada Fase Peluruhan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



**Gambar 11.** Kecepatan Angin, EPV, dan Suhu Permukaan Laut Siklon Tropis Lili di Laut Timor



**Gambar 12.** Kecepatan Angin, EPV, dan Suhu Permukaan Laut Siklon Tropis Lili pada Area Intensitas Angin Maksimum

Tabel 1 merupakan korelasi *lead* dan *lag* antara EPV harian dan kecepatan angin harian terhadap suhu permukaan laut harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peleburan dari siklon tropis Lili selama tanggal 02 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di Laut Timor. Berdasarkan gambar tersebut diketahui nilai korelasi tertinggi untuk EPV adalah -0,49 yang terjadi pada *lead* 1, sedangkan korelasi tertinggi untuk angin adalah -0,54 yang terjadi pada *lag* 4. Nilai tersebut menunjukkan bahwa korelasi terkuat untuk EPV terhadap suhu permukaan laut di Laut Timor memiliki hubungan sedang dan terbalik dimana perubahan suhu permukaan laut diikuti perubahan EPV setelah satu hari. Sementara korelasi terkuat untuk kecepatan angin terhadap suhu permukaan laut di Laut Timor memiliki hubungan sedang dan terbalik dimana perubahan angin diikuti perubahan suhu permukaan laut setelah empat hari.

Tabel 2 merupakan korelasi *lead* dan *lag* antara EPV harian dan kecepatan angin harian terhadap suhu permukaan laut harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peleburan dari siklon tropis Lili selama tanggal 02 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di wilayah dengan intensitas angin maksimum. Berdasarkan gambar tersebut diketahui nilai korelasi tertinggi untuk EPV adalah 0,6 yang terjadi pada *lag* 2, sedangkan korelasi tertinggi untuk angin adalah 0,68 yang terjadi pada *lead* 5. Nilai tersebut menunjukkan bahwa korelasi terkuat untuk EPV terhadap suhu permukaan laut di wilayah dengan intensitas angin maksimum memiliki hubungan kuat dan lurus dimana perubahan EPV diikuti perubahan suhu permukaan laut setelah dua hari. Sementara korelasi terkuat

untuk kecepatan angin terhadap suhu permukaan laut di wilayah dengan intensitas angin maksimum memiliki hubungan kuat dan lurus dimana perubahan suhu permukaan laut diikuti perubahan kecepatan angin setelah lima hari. Menurut Swandiko *et al.* (2021) angin kencang meningkatkan pelepasan panas laten dan penguapan, yang juga dapat menurunkan SPL.

### Klorofil-a

Gambar 13 merupakan visualisasi harian klorofil-a tujuh hari sebelum terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan klorofil-a mulai tanggal 2 Mei 2019 hingga 8 Mei 2019. Terlihat bahwa selama tujuh hari sebelum terjadi siklon tropis Lili nilai klorofil-a di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara 0 mg/m<sup>3</sup> hingga 2 mg/m<sup>3</sup>. Variabilitas klorofil-a tertinggi ditemui di pesisir utara Australia.

Gambar 14 merupakan visualisasi harian klorofil-a pada saat terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan klorofil-a mulai tanggal 9 Mei 2019 hingga 11 Mei 2019. Terlihat bahwa selama terjadi siklon tropis Lili nilai klorofil-a di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara 0 mg/m<sup>3</sup> hingga 2 mg/m<sup>3</sup> dengan variabilitas klorofil-a tertinggi ditemui di pesisir utara Australia. Terlihat bahwa variabilitas klorofil-a mengalami peningkatan pada fase matang yang disebabkan *upwelling* dan pencampuran vertikal (Cen *et al.*, 2024).

Gambar 15 merupakan visualisasi harian klorofil-a tujuh hari setelah terjadinya siklon tropis Lili. Visualisasi tersebut menampilkan klorofil-a

**Tabel 1.** Korelasi Lead dan Lag antara Suhu Permukaan Laut dengan Ekman Pumping Velocity dan Kecepatan Angin saat Siklon Tropis Lili di Laut Timor

Lead/Lag	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
EPV	-0.15	-0.39	-0.43	-0.44	-0.49	-0.46	-0.48	-0.38	-0.31	-0.19	-0.1
Angin	0.42	0.4	0.44	0.32	0.19	0.02	-0.15	-0.29	-0.43	-0.53	-0.6

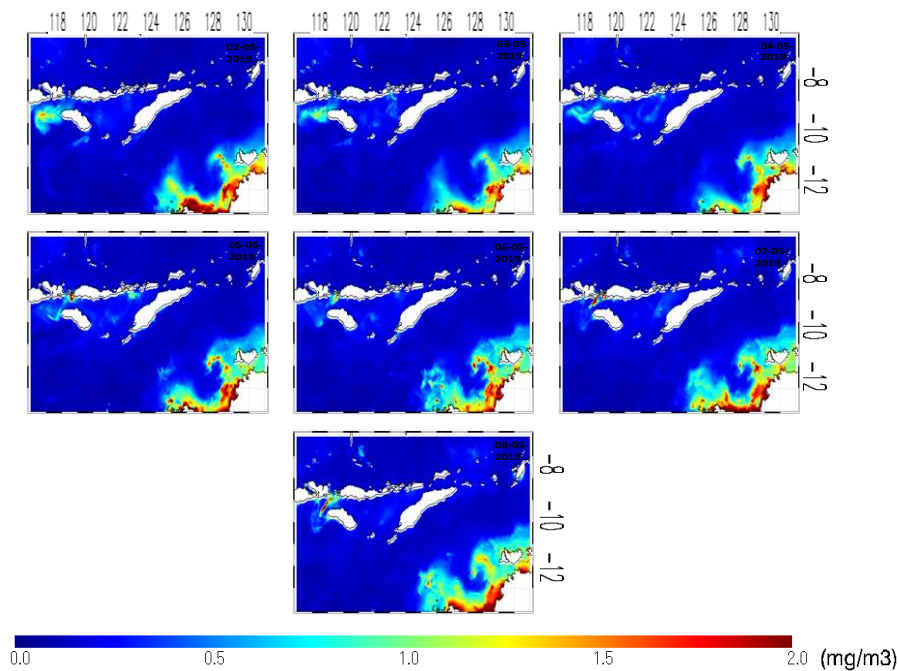
**Tabel 2.** Korelasi Lead dan Lag antara Suhu Permukaan Laut dengan Ekman Pumping Velocity dan Kecepatan Angin saat Siklon Tropis Lili pada Area Intensitas Angin Maksimum

Lead/Lag	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
EPV	-0.5	-0.39	-0.21	-0.04	0.14	0.34	0.53	0.6	0.51	0.29	0.06
Angin	0.68	0.55	0.38	0.18	-0.1	-0.35	-0.49	-0.54	-0.53	-0.41	-0.28

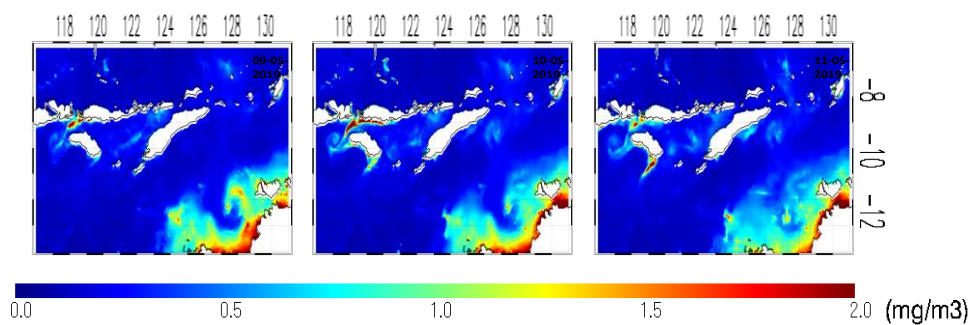
mulai tanggal 12 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019. Terlihat bahwa selama tujuh hari setelah terjadi siklon tropis Lili variabilitas klorofil-a di Laut Timor mengalami peningkatan pola persebaran terutama di Laut Timor yang menjadi lintasan siklon tropis Frances dengan nilai klorofil-a di Laut Timor dan sekitarnya berkisar antara 0 mg/m<sup>3</sup> hingga 2 mg/m<sup>3</sup>. Variabilitas klorofil-a tertinggi ditemui di pesisir utara Australia. Peningkatan klorofil-a juga dipengaruhi oleh karakteristik dari siklon tropis (Li dan Tang, 2022).

Gambar 16 menunjukkan grafik antara kecepatan angin harian, EPV harian, dan klorofil-a harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan

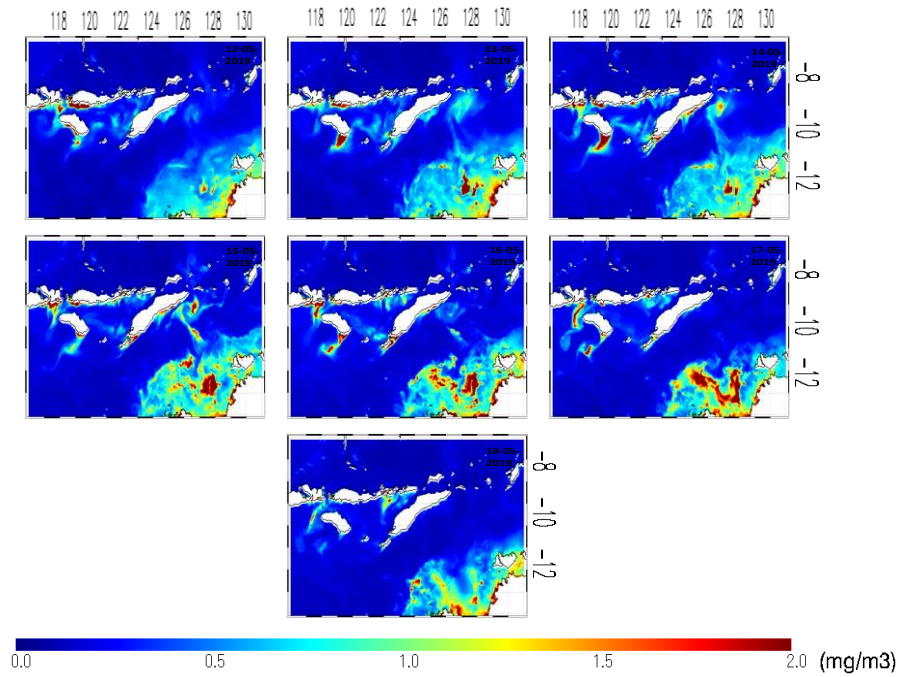
peluruhan dari siklon tropis Lili selama tanggal 2 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di Laut Timor. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa kecepatan angin berangsur naik mulai tanggal 2 Mei 2019 dan mencapai puncaknya pada tanggal 10 Mei 2019 dengan kecepatan 12 m/s. Parameter EPV menunjukkan bahwa nilainya mengalami fluktuasi dimana penurunan nilai EPV secara signifikan terjadi pada tanggal 5 Mei 2019 dan 11 Mei 2019. Sementara untuk klorofil-a menunjukkan bahwa nilainya mengalami penurunan dan mencapai nilai terendahnya pada tanggal 8 Mei 2019 dan 15 Mei 2019 dengan nilai masing-masing yaitu 1,3 mg/m<sup>3</sup> dan 1,2 mg/m<sup>3</sup>.



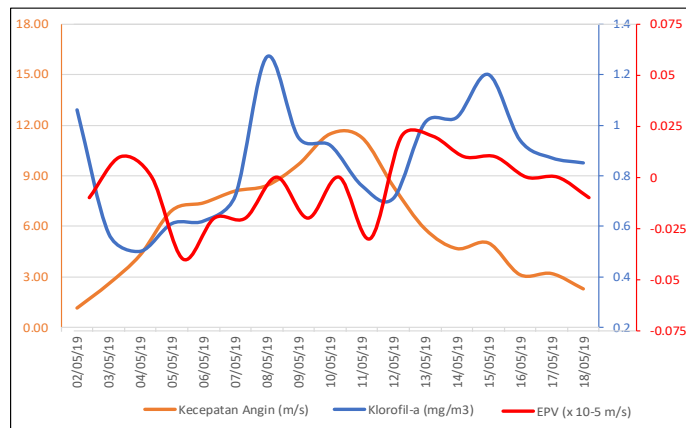
**Gambar 13.** Visualisasi Klorofil-a pada Fase Pembentukan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



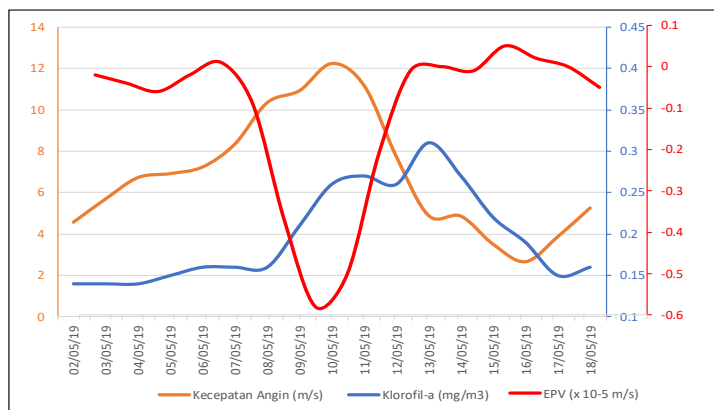
**Gambar 14.** Visualisasi Klorofil-a pada saat Kejadian Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



**Gambar 15.** Visualisasi Klorofil-a pada Fase Peluruhan Siklon Tropis Lili di Laut Timor dan sekitarnya



**Gambar 16.** Grafik Kecepatan Angin, EPV, dan Klorofil-a Siklon Tropis Lili di Laut Timor



**Gambar 17.** Grafik Kecepatan Angin, EPV, dan Klorofil-a Siklon Tropis Lili di Laut Timor

**Tabel 3.** Korelasi Lead dan Lag antara Klorofil-a dengan Ekman Pumping Velocity dan Kecepatan Angin saat Siklon Tropis Lili di Laut Timor

Lead/Lag	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
EPV	0.35	0.14	-0.12	0.36	0.25	0.34	0.32	0.07	-0.22	-0.21	0.15
Angin	-0.2	-0.05	0.04	0.02	-0.12	-0.02	0.23	0.27	0.29	0.06	-0.27

**Tabel 4.** Korelasi Lead dan Lag antara Klorofil-a dengan Ekman Pumping Velocity dan Kecepatan Angin saat Siklon Tropis Lili pada Area Intensitas Angin Maksimum

Lead/Lag	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
EPV	0.3	0.33	0.36	0.36	0.18	-0.16	-0.46	-0.68	-0.78	-0.76	-0.56
Angin	-0.51	-0.56	-0.59	-0.47	-0.15	0.2	0.53	0.8	0.89	0.82	0.65

Gambar 17 menunjukkan grafik antara kecepatan angin harian, EPV harian, dan klorofil-a harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peluruhan dari siklon tropis Lili di wilayah dengan intensitas angin maksimum. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa kecepatan angin berangsur naik mulai tanggal 2 Mei 2019 dan mencapai puncaknya pada tanggal 10 Mei 2019 dengan kecepatan 12 m/s. Parameter EPV menunjukkan bahwa nilainya mengalami penurunan secara signifikan mulai tanggal 7 Mei 2019 dan mencapai titik terendah pada tanggal 10 Mei 2019, kemudian mulai naik kembali pada tanggal 11 Mei 2019 dan kembali ke kondisi normal. Sementara untuk klorofil-a menunjukkan bahwa nilainya mengalami peningkatan mulai tanggal 8 Mei 2019 dan mencapai nilai tertinggi pada tanggal 13 Mei 2019 dengan nilai 0,31 mg/m<sup>3</sup>.

Tabel 3 merupakan korelasi *lead* dan *lag* antara EPV harian dan kecepatan angin harian terhadap klorofil-a harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peleburan dari siklon tropis Lili selama tanggal 02 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di Laut Timor. Berdasarkan gambar tersebut diketahui nilai korelasi tertinggi untuk EPV adalah 0,36 yang terjadi pada *lead* 2, sedangkan korelasi tertinggi untuk angin adalah 0,29 yang terjadi pada *lag* 3. Nilai tersebut menunjukkan bahwa korelasi terkuat untuk EPV terhadap klorofil-a di Laut Timor memiliki hubungan lemah dan lurus yang mengalami percepatan selama dua hari. Sementara korelasi terkuat untuk kecepatan angin terhadap klorofil-a di Laut Timor memiliki hubungan lemah dan lurus yang mengalami penundaan selama tiga hari.

Tabel 4 merupakan korelasi *lead* dan *lag* antara EPV harian dan kecepatan angin harian

terhadap klorofil-a harian pada saat masa pembentukan, kejadian, dan peleburan dari siklon tropis Lili selama tanggal 02 Mei 2019 hingga 18 Mei 2019 di wilayah dengan intensitas angin maksimum. Berdasarkan gambar tersebut diketahui nilai korelasi tertinggi untuk EPV adalah -0,78 yang terjadi pada *lag* 3, sedangkan korelasi tertinggi untuk angin adalah 0,89 yang terjadi pada *lag* 3. Nilai tersebut menunjukkan bahwa korelasi terkuat untuk EPV terhadap klorofil-a di wilayah dengan intensitas angin maksimum memiliki hubungan kuat dan terbalik yang mengalami penundaan selama tiga hari. Sementara korelasi terkuat untuk kecepatan angin terhadap klorofil-a di wilayah dengan intensitas angin maksimum memiliki hubungan kuat dan lurus yang mengalami penundaan selama tiga hari. *Delay* atau penundaan reaksi klorofil-a pada saat terjadinya siklon tropis Lili disebabkan oleh karena adanya tutupan awan serta bias data yang juga disebabkan oleh awan yang menghalangi pengamatan yang dilakukan oleh satelit (Chai, *et al.*, 2020).

## KESIMPULAN

Siklon Tropis Lili menurunkan SPL antara 0,5°C hingga 1°C pada fase puncak siklon tropis dan meningkatkan klorofil-a antara 0,5 mg/mm<sup>3</sup> hingga 1,5 mg/mm<sup>3</sup> pada fase peluruhan siklon tropis di Laut Timor. EPV negatif menyebabkan upwelling, menurunkan SST dan meningkatkan klorofil-a. Selain itu, angin kencang meningkatkan pelepasan panas laten dan penguapan, yang juga memengaruhi penurunan SPL. Analisis korelasi menunjukkan korelasi yang bervariasi antara parameter siklon tropis yaitu angin dan EPV terhadap suhu permukaan laut dan klorofil-a pada saat masing-masing kejadian siklon tropis di laut

Timor dan daerah intensitas angin maksimum. Hal tersebut disebabkan oleh intensitas dan pergerakan siklon tropis, kondisi geografis serta waktu yang diperlukan antar parameter yang dikorelasikan untuk merespon.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amir, S., Hilyana, S., Waspodo, S., Gigentika, S., & Jefri, E. 2021. Analisis Potensi dan Pemanfaatan Sumberdaya Ikan (SDI) Yang Didaratkan di Pelabuhan Perikanan Teluk Awang. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan, Special Issue*, pp.108-116. doi: 10.29303/jstl.v0i0.265.
- Bernades, H., Suryoputro, A.A.D., Wirasatriya, A., Handoyo, G., Rifai, A., Maslukah, L., & Sugianto, D.N. 2021. The effect of Ekman mass transport and Ekman pumping velocity on the variability of sea surface temperature in the Arafura Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 919(1): p. 012026. doi: 10.1088/1755-1315/919/1/012026.
- Burnett, A.C., Sheshadri, A., Silvers, L.G., & Robinson, T. 2021. Tropical cyclone frequency under varying SSTs in aquaplanet simulations. *Geophysical Research Letters*, 48(5):e2020GL091980. doi: 10.1029/2020GL091980.
- Cen, H., Han, G., Lin, X., Liu, Y., & Zhang, H. 2024. Deep learning-based forecasting model for chlorophyll-a response to tropical cyclones in the Western North Pacific. *Ocean Modelling*, 5:p.102345. doi: 10.1016/j.oce mod.2024.102345.
- Chai, F., Wang, Y., Xing, X., Yan, Y., Xue, H., Wells, M., & Boss, E. 2020. A limited effect of sub-tropical typhoons on phytoplankton dynamics. *Biogeosciences Discussions*, 2020: 1-16. doi: 10.5194/bg-18-849-2021.
- Endriani, Z., & Fauziah, A. 2020. Analisis Siklogenesi Siklon Tropis Dahlia Menggunakan Citra Satelit Himawari. *Megasains*, 11(1): 31-35. doi: 10.46824/mega sains.v11i01.1
- Fitri, N., Muliadi, M., & Adriat, R. 2022. Analisis Dampak Siklon Tropis Pabuk terhadap Unsur Cuaca di Kalimantan Barat. *Prisma Fisika*, 10(1): 14-18.
- Fukushima, T., & Matsushita, B. 2021. Limiting nutrient and its use efficiency of phytoplankton in a shallow eutrophic lake, Lake Kasumigaura. *Hydrobiologia*, 848(15): 3469-3487. doi: 10.1007/s10750-021-04593-y.
- Khadami, F., & Purnaningtyas, D. W. 2021. Ocean response to tropical cyclone Seroja at East Nusa Tenggara waters. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1): p. 12045. doi: 10.1088/1755-1315/925/1/012045.
- 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. doi: 10.22034/gjesm.2022.03.05.
- Li, Y., & Tang, D. 2022. Tropical cyclone Wind Pump induced chlorophyll-a enhancement in the South China Sea: A comparison of the open sea and continental shelf. *Frontiers in Marine Science*, 9:p.1039824. doi: 10.3389/fmars.2022.1039824.
- Lü, H., Zhao, X., Sun, J., Zha, G., Xi, J., & Cai, S. 2020. A case study of a phytoplankton bloom triggered by a tropical cyclone and cyclonic eddies. *PLoS One*, 15(4): e0230394. doi: 10.1371/journal.pone.0230394.
- Ma, X., Xie, F., Chen, X., Liu, N., & Liang, R. 2024. The frequency of autumn western North Pacific tropical cyclone linking to spring western pacific SST anomalies. *Environmental Research Letters*, 19(8): p.084019. doi: 10.1088/1748-9326/ad5fa8.
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D.N., Ambariyanto, A., & Sunaryo, S. 2021. Respon Kecepatan Angin Terhadap Variabilitas Klorofil-a di Laut Filipina Dan Maluku Bagian Utara. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3): 269-276.
- Nemoto, K., Yokoyama, Y., Horiike, S., Obrochta, S.P., & Miyairi, Y. 2024. Meridional Migrations Of The Intertropical Convergence Zone During The Last Deglaciation In The Timor Sea Detected By Extensive Radiocarbon Dating. *Radiocarbon*, pp.1-10. doi: 10.1017/RDC.2024.13.
- Ninggar, R.D., & Siregar, D.C. 2020. Analisis Siklon Tropis Mangga Dan Dampaknya Terhadap Kondisi Cuaca Di Indonesia. *Jurnal Widya Climago*, 2(2):69-76.
- Nurafifah, U. O., Zainuri, M., & Wirasatriya, A. 2022. Pengaruh ENSO dan IOD Terhadap Distribusi Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Pada Periode Upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(3): 74-85. doi: 10.14710/ijoce.v4i3.14971

- Pramlall, S., Jackson, J.M., Konik, M., & Costa, M. 2023. Merged multi-sensor ocean colour chlorophyll product evaluation for the British Columbia coast. *Remote Sensing*, 15(3):p.687. doi: 10.3390/rs15030687.
- Rachim, M.H., Schaduw, J.N.W., Wantasen, A.S., Patty, W., & Ngangi, E.L.A. 2021. Impact of tropical cyclone Amang on variability of wind speed, salinity, sea surface temperature, and their relationship to chlorophyll-a in sea waters of Sangihe Island. *Aquatic Science & Management*, 9(2):48-54. doi: 10.35800/jasm.v9i2.34589.
- Ruan, Z., Li, B., Yu, C., Ding, R., Bai, P., & Wu, Q. 2024. The impact of tropical cyclone outer size on ocean surface responses. *Frontiers in Marine Science*, 11, p.1429384. doi: 10.3389/fmars.2024.1429384.
- Rosalina, L., Oktarina, R., Rahmiati, R., & Saputra, I. 2023. Buku Ajar Statistika. 1st ed. Padang: CV. Muharika Rumah Ilmiah.
- Sadarang, F.R. 2022. Study of single- and double-moment microphysics scheme impact on Lili and mangga tropical cyclone. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 23(3): p.25. doi:10.31172/jmg.v23i3.804.
- Sagala, E.A., & Saragih, I.J.A. 2021. Kajian Dampak Siklon Tropis Cempaka Terhadap Variabilitas Kejadian Upwelling Di Perairan Selatan Jawa. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 1(1):193-200.
- Setiawan, R. Y., Susanto, R. D., Wirasatriya, A., Alifdini, I., Puryajati, A. D., Maslukah, L., & Nurdin, N. (2021). Impacts of tropical cyclone Seroja on the phytoplankton chlorophyll-a and sea surface temperature in the Savu Sea, Indonesia. *IEEE Access* 9, pp.152938-152944. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3125605
- 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. doi: 10.22236/jgel.v4i2.4354
- Swandiko, M., Wirasatriya, A., Marwoto, J., Muslim, M., Indrayanti, E., Subardjo, P., & Ismunarti, D. H. 2021. Studi persistensi suhu permukaan laut tinggi (> 30 C) di perairan Selat Malaka. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(2): doi: 10.14710/buloma.v10i2.31554.
- Trisianto, G., Wulandari, S.Y., Suryoputro, A.A. D., Handoyo, G., & Zainuri, M. 2021. Studi variabilitas upwelling di laut banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1) : 25-35. doi: 10.14710/ijoce.v3i1.9764
- Wirasatriya, A., Setiawan, J., Sugianto D., Rosyadi, I., Haryadi, Winarso, G., Setiawan, R., & Susanto, R. 2020. Ekman dynamics variability along the southern coast of Java revealed by Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(21): 8475–8496. doi:10.1080/01431161.2020.1797215.
- Wirasatriya, A., & Kunarso, K. 2024. Studi Pengaruh Siklon Tropis Flamboyan Terhadap Suhu Permukaan Laut Dan Klorofil-a Di Perairan Samudra Hindia Barat Daya Sumatra. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(3): 266-274. doi: 10.14710/ijoce.v6i3.18989.
- Yang, S., Bankert, R., & Cossuth, J. 2020. Tropical cyclone climatology from satellite passive microwave measurements. *Remote Sensing*, 12(21): p.3610. doi: 10.3390/rs12213610.
- Zhu, Y., Li, Y., Wang, F., & Lv, M. 2022. Weak mesoscale variability in the optimum interpolation sea surface temperature (OISST)-AVHRR-Only Version 2 data before 2007. *Remote Sensing*, 14(2): p409. doi: 10.3390/rs14020409.