

# VARIABILITAS BULANAN *THERMAL FRONT* DI WILAYAH PENGELOLAAN PERIKANAN REPUBLIK INDONESIA 714 (LAUT BANDA)

## *MONTHLY VARIABILITY OF THERMAL FRONT IN THE REPUBLIC OF INDONESIA FISHERIES MANAGEMENT AREA 714 (BANDA SEA)*

Annisa Aulia Lukman<sup>1,2\*</sup>, Gandhi Napitupulu,<sup>3,2,4</sup> Ayi Tarya<sup>2,3,4</sup>, Widodo Pranowo<sup>5</sup>, Rahaden Bagas Hatmaja<sup>5</sup>,  
Ahmad Dhuha Habibullah<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Magister Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>3</sup> Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Cirebon, Indonesia

<sup>4</sup> Kelompok Keahlian Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>5</sup> Pusat Penelitian Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia

\*aualialukman@lecturer.undip.ac.id

Diterima : 22 Agustus 2024 Disetujui : 30 Juni 2024

### ABSTRAK

Penelitian tentang sebaran spasial *thermal front* di perairan Indonesia pada dasarnya telah banyak dilakukan. Namun, kajian yang secara khusus menganalisis dinamika *thermal front* akibat arus sejajar pantai, yang memicu fenomena *Ekman pumping*, dan arus eddy masih terbatas. Arus sejajar pantai dapat memicu *Ekman pumping*, sedangkan *Ekman pumping* dan eddy mesoskal dapat menyebabkan naiknya massa air bersuhu rendah dari lapisan bawah ke permukaan laut. Proses ini memicu pembentukan *thermal front*, yang banyak ditemukan di Laut Banda. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variabilitas bulanan dinamika *thermal front* di Laut Banda yang dipengaruhi oleh arus sejajar pantai dan eddy. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah Suhu Permukaan Laut (SPL) dari tahun 2006 hingga 2020. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata kejadian *thermal front* yang terdeteksi adalah sebanyak 1.385 kejadian per bulan berdasarkan jumlah piksel, dan 17 kejadian berdasarkan jumlah poligon. Jumlah maksimum kejadian *thermal front* terjadi pada bulan Desember (2.416 kejadian), dan jumlah minimum terjadi pada bulan November (883 kejadian).

Berdasarkan hasil penelitian ditemukan bahwa eddy antisiklonik (AE) dan eddy siklonik (CE), terjadi dengan durasi rata-rata 11,419 hari untuk AE dan 11,812 hari untuk CE. AE dan CE di Laut Banda ini berkaitan dengan penurunan SPL, peningkatan konsentrasi klorofil-a permukaan laut, serta penurunan tinggi muka laut, yang menunjukkan terjadinya proses *upwelling* serta pembentukan *thermal front* di Laut Banda khususnya pada monsun barat laut.

**Kata kunci:** Arus eddy, *Ekman pumping*, Tinggi muka laut, Klorofil-a permukaan laut, *Thermal front*

## ABSTRACT

*Studies on the spatial distribution of thermal fronts in Indonesian waters have been widely conducted; however, investigations focusing on the dynamics of thermal fronts driven by coastal currents—particularly Ekman pumping—and eddies remain limited. Coastal parallel currents can induce Ekman pumping, while both Ekman pumping and mesoscale eddies contribute to the vertical uplift of colder subsurface waters, leading to the formation of thermal fronts. These processes are frequently observed in the Banda Sea. Therefore, the objective of this study is to analyze the monthly variability of thermal front dynamics in the Banda Sea in relation to coastal currents and mesoscale eddies. This study utilizes Sea Surface Temperature (SST) data from 2006 to 2020. The results indicate that an average of 1,385 thermal front occurrences (based on pixel counts) and 17 (based on polygon counts) were detected per month, with the highest number occurring in December (2,416 events) and the lowest in November (883 events). Ekman pumping and eddies, specifically anticyclonic eddies (AE) and cyclonic eddies (CE), were identified, with average durations of 11.419 days for AE and 11.812 days for CE. These AE and CE were associated with a decrease in SST, an increase in sea surface chlorophyll-a (SSC), and a decline in Sea Surface Height (SSH), indicating enhanced upwelling conditions and contributed to Banda Seas frontogenesis in northwest monsoon.*

**Keyword:** Eddy current, Ekman pumping, Sea surface chlorophyll-a, Sea surface height, Thermal front

## PENDAHULUAN

Laut Banda memiliki peran yang signifikan dalam mengatur iklim global dan mempengaruhi dinamika lautan regional (Napitupulu dkk., 2025). Salah satu fenomena yang menarik perhatian adalah pergerakan dan variasi *thermal front* di wilayah ini. *Thermal front* merupakan zona peralihan antara massa air berbeda suhu yang memiliki dampak yang signifikan terhadap proses fisik dan biologis di lautan, termasuk distribusi plankton, migrasi ikan, dan pola arus laut.

Identifikasi *thermal front* juga berguna dalam penentuan zona potensial penangkapan ikan (Jishad dkk., 2021; Jishad & Agarwal, 2022; Suhadha & Ibrahim, 2020). Di Indonesia *thermal front* menjadi parameter input primer oleh LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) dalam identifikasi Zona Potensi Penangkapan Ikan atau ZPPI (Suhadha & Ibrahim, 2020). Berdasarkan beberapa contoh peranan dari *thermal front* yang telah disebutkan diatas, maka pemetaan *thermal front* menjadi salah satu aspek penting dalam oseanografi fisis (Belkin & O'Reilly, 2009) serta mendorong penelitian ini dilakukan.

Dalam mempelajari karakteristik *thermal front* maka pendekatan penginderaan jauh digunakan

untuk menganalisis suhu air laut (Valavanis dkk., 2005). Data suhu permukaan laut (SPL) diukur oleh sensor satelit yang bekerja pada spektrum inframerah termal seperti Landsat, NOAA, Aqua/Terra (Hamzah dkk., 2014). Ullman dan Cornillon (2002) serta Jishad dan Agarwal (2022), menyatakan dengan menggunakan metode histogram batas tepi (*histogram-based edge detection*) maka diperoleh hasil statistik yang lebih akurat dalam mendeteksi *thermal front* berdasarkan data SPL jangka panjang. Salah satu teknik deteksi *thermal front* berdasarkan metode histogram batas tepi adalah SIED (*Single Edge Image Detection*) yang dibangun oleh Cayula dan Cornillon (1992). Metode SIED telah diintegrasikan ke dalam ArcGIS tool MGET (*Marine Geospatial Ecology Tool*) yang dikembangkan oleh tim *Duke Marine Ecology Lab* dan disebarluaskan secara gratis (Trinugroho dkk., 2019).

Metode SIED telah digunakan dalam mendeteksi *thermal front* di perairan Indonesia. Dengan menggunakan metode ini *thermal front* ditemukan pada selatan Laut Banda pada bulan September hingga November, sedangkan pada bulan Maret hingga Agustus ditemukan di Laut Jawa, Laut Sulawesi, Laut Flores, Laut Banda, Laut Arafura

bagian utara (Belkin & O'Reilly, 2009; Karima et al., 2025). Penelitian tentang *thermal front* di perairan Indonesia dengan metode SIED juga dilakukan oleh Jatisworo & Murdimanto (2013) untuk mengidentifikasi *thermal front* di Selat Makassar dan Laut Banda, Hamzah dkk. (2014) di perairan utara dan selatan pulau Jawa, Hanintyo dkk. (2015) di WPP-RI 714-716, Rintaka (2015) di perairan utara Maluku dan Papua, Mustasim dkk. (2015) di perairan Seram, Panggabean dkk. (2018) di provinsi Riau, Ahmad dkk. (2019) di perairan selatan Jawa Timur dan Bali, Rohima Daulay dkk. (2019) di Samudra Hindia bagian timur, Trinugroho dkk. (2019) di Selat Madura, Jatiandana & Nurdjaman (2020) di seluruh perairan Indonesia, Suhadha & Ibrahim (2020) di Selat Bali, Suhadha & Ibrahim (2020) di WPPNRI 715, Safruddin dkk. (2019) di Selat Makassar.

*Thermal front* berasosiasi dengan gradien temperatur yang disebabkan oleh fenomena fisis di lautan seperti *upwelling*, arus eddy, serta berbagai mekanisme interaksi atmosfer-laut lainnya (Jishad & Agarwal, 2022; Napitupulu dkk., 2024). Seperti yang ditemukan pada Selat Sape atau lokasi ditemukannya *thermal front*, konsentrasi klorofil-a lebih tinggi jika dibandingkan Laut Timor atau lokasi tanpa *thermal front* (Jatiandana & Nurdjaman, 2020). Sedangkan pada perairan Selat Madura, *thermal front* terbentuk akibat arus eddy serta pertemuan antara arus dari arah barat Selat Madura dan arus dari arah selatan Selat Bali (Trinugroho dkk., 2019). Pada perairan Selat Makassar, *thermal front* merupakan indikator yang baik dalam mendeteksi wilayah *upwelling* serta wilayah tangkapan ikan cakalang atau *Katsuwonus pelamis* (Safruddin dkk., 2019). Meskipun perbedaan rata-rata SPL musiman di perairan Indonesia tidak sebesar perairan-perairan lintang tinggi, seperti pada lokasi ditemukannya kejadian *thermal front* permanen seperti *Gulf Stream*, dinamika dari kejadian *thermal front* di Indonesia juga berasosiasi dengan fenomena lain seperti *upwelling* dan arus eddy (Lukman dkk., 2022).

Menurut Ramadhan dkk. (2020), sirkulasi atau arah perputaran arus eddy dapat berbentuk siklonik (CE) (searah jarum jam di Belahan Bumi Selatan/BBS dan berlawanan arah jarum jam di Belahan Bumi Utara/BBU) dan antisiklonik (AE) (berlawanan arah jarum jam di BBS dan searah jarum jam di BBU). Pada beberapa kejadian, arus eddy merupakan bagian dari morfologi *front* yang berbentuk pusaran melingkar serta berperan dalam proses *mixing* di lokasi terjadinya *front* (Lutjeharms dan Stockton, 1987). Sebagai contoh pada sistem

*upwelling* di perairan selatan Afrika, *frontal eddy* terdistribusi diseluruh wilayah *upwelling front* dan membawa massa air permukaan Atlantik Selatan (*South Atlantic Surface Water*) yang hangat ke wilayah pantai (Lutjeharms dan Stockton, 1987). Pada wilayah lautan yang lain, SPL pada wilayah barat pulau Luzon membentuk *front* di lokasi Luzon eddy siklonik. Luzon eddy siklonik diiringi dengan anomali negatif (positif) SPL di wilayah barat laut (tenggara) mendorong terbentuknya *thermal front* Luzon (Wang dkk., 2012). Pada Laut China Selatan, *thermal front* terbentuk pada wilayah tepi eddy atau *peripheries of eddies* (Napitupulu, 2025). Fenomena fisis lautan seperti arus eddy dan *front* dapat memberikan variasi terhadap SPL dan konsentrasi klorofil-a serta membentuk produktivitas perairan (Ye dkk., 2017). *Thermal front* yang terbentuk pada wilayah arus eddy yang ini berperan dalam meningkatkan konsentrasi klorofil-a pada perairan (Ye dkk., 2017).

Identifikasi *thermal front* di Laut Banda telah dilakukan oleh Belkin dan Cornillon (2003), Jatisworo dan Murdimanto (2013), Jatiandana (2019), serta Syah dan Sholehah (2021). Penelitian-penelitian yang telah dilakukan menemukan *thermal front* secara spasial serta temporal, namun secara spesifik informasi tentang variabilitas bulanan *thermal front* di Laut Banda yang dikaji berkaitan dengan fenomena fisis lain seperti arus eddy dan klorofil-a masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pergerakan bulanan *thermal front*, dengan fokus pada pengaruh siklus musiman dan faktor-faktor lokal yang mempengaruhinya. Dengan memanfaatkan data citra satelit resolusi tinggi, kami berupaya untuk mengidentifikasi pola spasial dan temporal dari *thermal front*, serta menghubungkan variabilitas ini dengan dinamika lautan regional dan kondisi atmosfer lokal. Penelitian ini tidak hanya akan memberikan wawasan baru tentang dinamika lautan di wilayah Laut Banda, tetapi juga memiliki implikasi yang relevan dalam konteks pengelolaan sumber daya kelautan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang variabilitas *thermal front* bulanan, diharapkan dapat memberikan landasan yang kuat untuk pengembangan strategi pengelolaan yang berkelanjutan dan adaptif, serta membantu memprediksi pengelolaan sumber daya kelautan di masa depan.

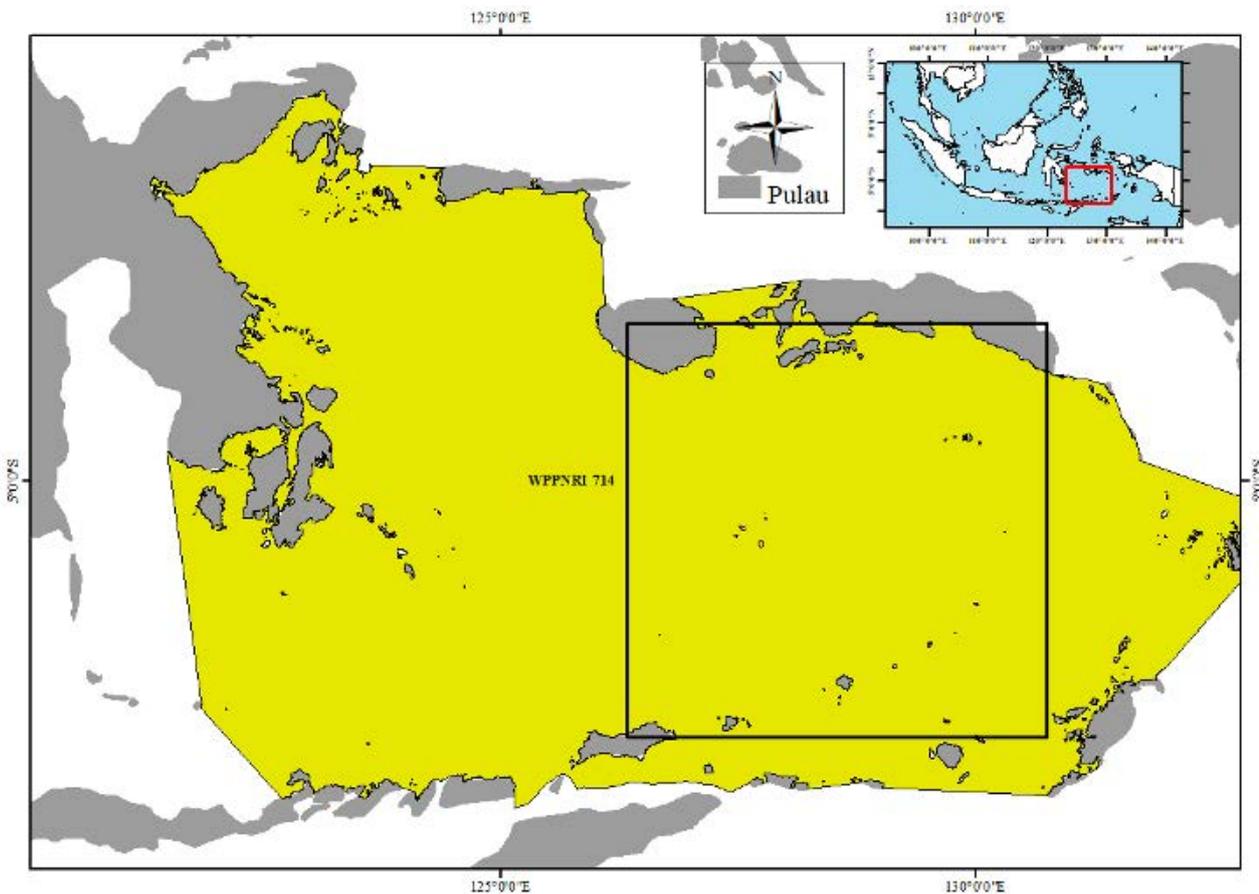
## DATA DAN METODE

### Data

Lokasi penelitian *thermal front* di Laut Banda terletak pada koordinat 1°8'47" LS - 8°27'51" LS dan 121°28'18" BT - 133°7'19"BT (Gambar 1).

Berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2014, Laut Banda termasuk ke dalam wilayah pengelolaan perikanan Negara Republik Indonesia (WPPNRI) 714. Luas wilayah pengelolaan perikanan Laut Banda adalah 662.484,3027 km<sup>2</sup>.

konsentrasi klorofil-a permukaan laut harian dengan resolusi spasial yang sama dari AquaMODIS pada periode yang sama juga dimanfaatkan. Data bulanan klorofil-a digunakan untuk mengkaji potensi hubungan antara kondisi biologis perairan dan keberadaan *thermal front*. Untuk mengidentifikasi



Gambar 1. Daerah kajian di Laut Banda (kotak warna hitam menunjukkan daerah kajian arus eddy).

Koordinat wilayah penelitian ini dipilih untuk menganalisis karakteristik *thermal front* yang terbentuk di Laut Banda secara spasial dan temporal, mengidentifikasi proses pembentukan *thermal front*, serta memahami pengaruh fenomena oseanografi yang relatif sering terjadi, seperti arus eddy dan *upwelling*, terhadap *thermal front*. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis komprehensif mengenai fenomena *thermal front* di Laut Banda.

Penelitian ini mengandalkan pada berbagai sumber data citra satelit dan model untuk menginvestigasi fenomena *thermal front* di Laut Banda. Data utama yang digunakan adalah data SPL harian yang diperoleh dari citra satelit AquaMODIS (Tabel 1). Data harian ini kemudian diintegrasikan menjadi data bulanan dan klimatologi bulanan untuk keperluan deteksi *thermal front* serta analisis korelasinya dengan parameter lain. Selain SPL, data

indikasi fenomena *upwelling* dan dinamika lapisan atas laut yang mungkin terkait dengan pembentukan *thermal front*, data anomali tinggi muka laut (SLA) harian dari CDS Catalogue ERA 5. Terakhir, data arus permukaan harian, termasuk komponen zonal ( $u_{geos}$ ), meridional ( $v_{geos}$ ), dan kecepatan total dari Marine Copernicus, digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan arus eddy dan menganalisis dinamika arus yang mungkin berkontribusi pada pembentukan dan variabilitas *thermal front* di Laut Banda.

#### Deteksi *Thermal front*

Ada beberapa langkah dalam memproses citra SPL untuk mendeteksi *front* menggunakan metode SIED (*Single Image Edge Detection*). Tahap pertama adalah dengan mengkonversi nilai SPL bulanan dari bentuk bilangan desimal (*float*) menjadi bilangan bulat (*integer*). Kemudian, data yang telah

Tabel 1. Data yang digunakan dalam penelitian

No.	Data yang Digunakan	Sumber Data	Resolusi Data
1	Suhu permukaan laut	DOI: <a href="https://doi.org/10.48670/moi-00021">https://doi.org/10.48670/moi-00021</a>	Harian, 4 km x 4 km
2	Klorofil-a permukaan laut	DOI: <a href="https://doi.org/10.48670/moi-00021">https://doi.org/10.48670/moi-00021</a>	Harian, 4 km x 4 km
3	Tinggi gelombang signifikan	DOI: <a href="https://doi.org/10.48670/moi-00148">https://doi.org/10.48670/moi-00148</a>	Harian, 0.25° x 0.25°
4	Tinggi muka air anomali	DOI: <a href="https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78">https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78</a>	Harian, 0.25° x 0.25°
5	$u_{geos}$ dan $v_{geos}$	DOI: <a href="https://doi.org/10.48670/moi-00021">https://doi.org/10.48670/moi-00021</a>	Harian, 0.25° x 0.25°

dikonversi menjadi bilangan bulat dimasukkan ke dalam modul *Find Cayula-Cornillon Fronts*. Pada modul ini kemudian dilakukan proses deteksi *front* dengan memasukkan nilai batas ambang atau *threshold* suhu dengan ukuran *window size* sebesar 32 x 32 piksel dan median filter 3. Batas *window size* diperlukan karena perbedaan SPL antar piksel tidak selalu menunjukkan kejadian *thermal front*, dikategorikan sebagai kejadian *thermal front* apabila histogram pada *window* yang digunakan terdapat dua puncak atau *bimodal* (Cayula dan Cornillon, 1992; Trinugroho dkk., 2019; Jatiandana, 2019). Nilai batas ambang suhu yang digunakan pada penelitian ini sebesar 1°C, yang artinya *front* dapat dideteksi dengan melihat perbedaan suhu sebesar 1°C pada nilai piksel yang bersebelahan (Trinugroho dkk., 2019).

### Deteksi Arus Eddy

Penelitian ini menggunakan metode hybrid untuk mengidentifikasi eddy laut, menggabungkan parameter Okubo-Weiss dan kriteria geometrik (SLA). Eddy didefinisikan sebagai wilayah koheren dengan kontur SLA tertutup dan nilai Okubo-Weiss negatif. Langkah pertama melibatkan perhitungan jarak antar grid ( $dx$  dan  $dy$ ) dan pembuatan kontur SLA dari interval terkecil hingga terbesar. Kontur tertutup diidentifikasi dengan memeriksa setiap kontur yang terbentuk dan memastikan terdapat kontur yang tersambung. Eddy kemudian dikarakterisasi berdasarkan nilai vortisitas dan parameter Okubo-Weiss.

Perhitungan Okubo-Weiss dilakukan dengan menggunakan data arus geostropik untuk menghitung nilai regangan normal ( $S_n$ ), regangan geser ( $S_s$ ), dan vortisitas relatif ( $\xi$ ). Hasil

perhitungan  $S_n$ ,  $S_s$ , dan  $\xi$  digunakan dalam rumus Okubo (1970) dan Weiss (1991) sebagai berikut:

$$W = S_n^2 + S_s^2 + \xi^2 \quad (1)$$

$$\text{dengan } S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}; S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \text{ dan } \xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Metode hybrid ini menggabungkan informasi spasial (kontur SLA) dan dinamis (parameter Okubo-Weiss) untuk mengidentifikasi eddy laut secara lebih akurat. Metode ini dapat mengidentifikasi eddy dengan berbagai bentuk dan ukuran, mempertimbangkan informasi spasial dan dinamis, dan relatif mudah diimplementasikan.

### Korelasi *Thermal Front* dengan Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a

Untuk menginvestigasi hubungan atau korelasi antara fenomena *thermal front* dengan parameter SPL dan konsentrasi klorofil-a di Laut Banda, analisis korelasi Pearson dilakukan. Nilai bulanan dari kejadian *thermal front* dan parameter SPL serta klorofil-a selama periode 15 tahun pengamatan, yaitu dari Januari 2006 hingga Desember 2020, digunakan dalam perhitungan koefisien korelasi Pearson.

Koefisien korelasi Pearson ( $r$ ) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2)$$

dengan  $r$  = koefisien korelasi Pearson,  $x$  = nilai bulanan *thermal front*,  $y$  = nilai bulanan SPL atau klorofil-a,  $n$  = jumlah data (jumlah bulan dalam periode pengamatan). Nilai koefisien korelasi Pearson ( $r$ ) berkisar antara -1 hingga +1. Nilai positif menunjukkan korelasi positif (kenaikan satu variabel cenderung diikuti kenaikan variabel lain), nilai negatif menunjukkan korelasi negatif (kenaikan satu variabel cenderung diikuti penurunan variabel

lain), dan nilai mendekati nol menunjukkan korelasi yang lemah atau tidak ada korelasi linear antar kedua variabel.

Selain menghitung koefisien korelasi tanpa lag, analisis lag dan lead juga diterapkan untuk mengidentifikasi potensi hubungan temporal antara thermal front dan parameter SPL serta klorofil-a. Analisis ini melibatkan perhitungan korelasi antara nilai thermal front pada suatu bulan dengan nilai SPL atau klorofil-a pada bulan sebelumnya (lag) atau bulan berikutnya (lead), hingga lag dan lead maksimal 6 bulan. Hal ini bertujuan untuk memahami apakah perubahan pada SPL atau klorofil-a mendahului pembentukan thermal front, atau sebaliknya.

Signifikansi statistik dari nilai koefisien korelasi dievaluasi menggunakan nilai p (p-value). Korelasi dianggap signifikan secara statistik jika nilai p kurang dari 0,05 (p<0,05).

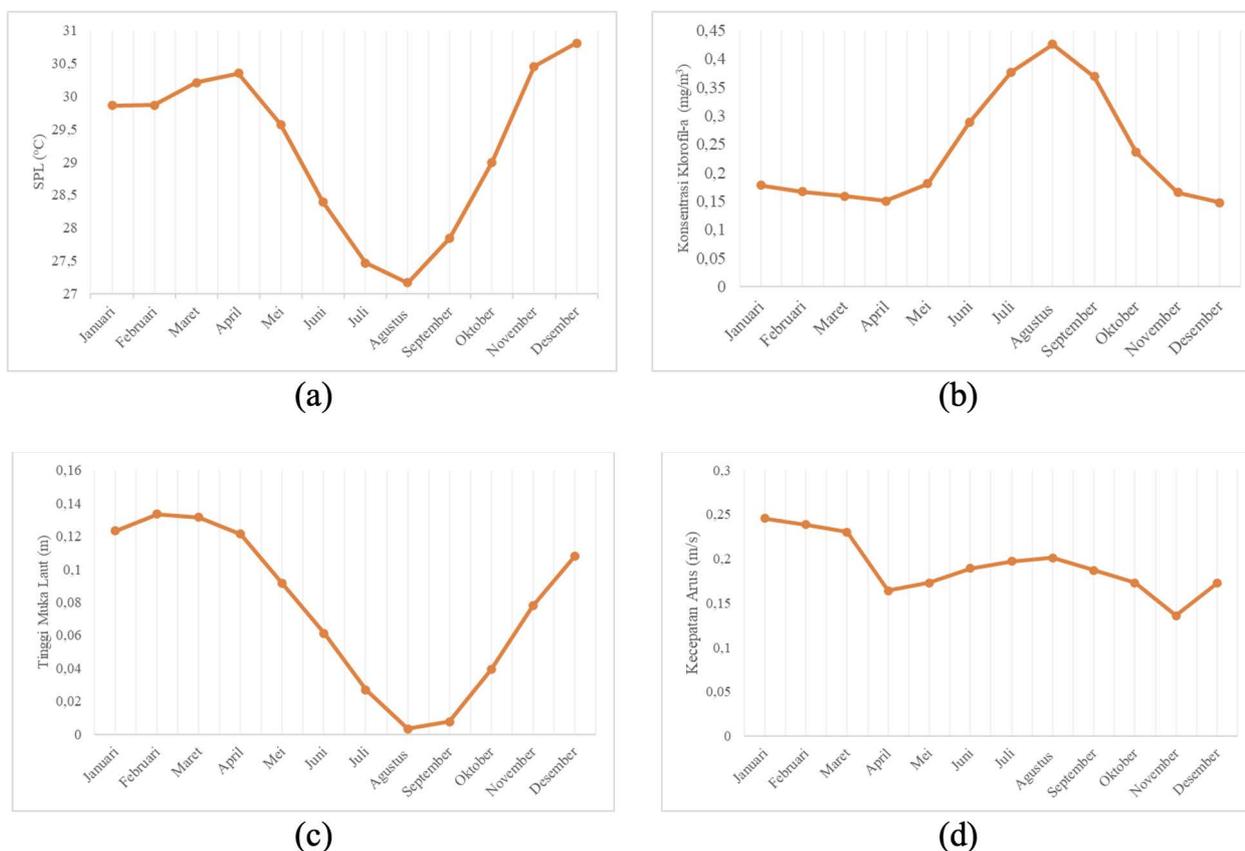
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kejadian thermal front di Laut Banda dilakukan dengan menggunakan data SPL sebagai data utama. Selain digunakan sebagai data utama untuk menemukan thermal front, analisis lanjutan

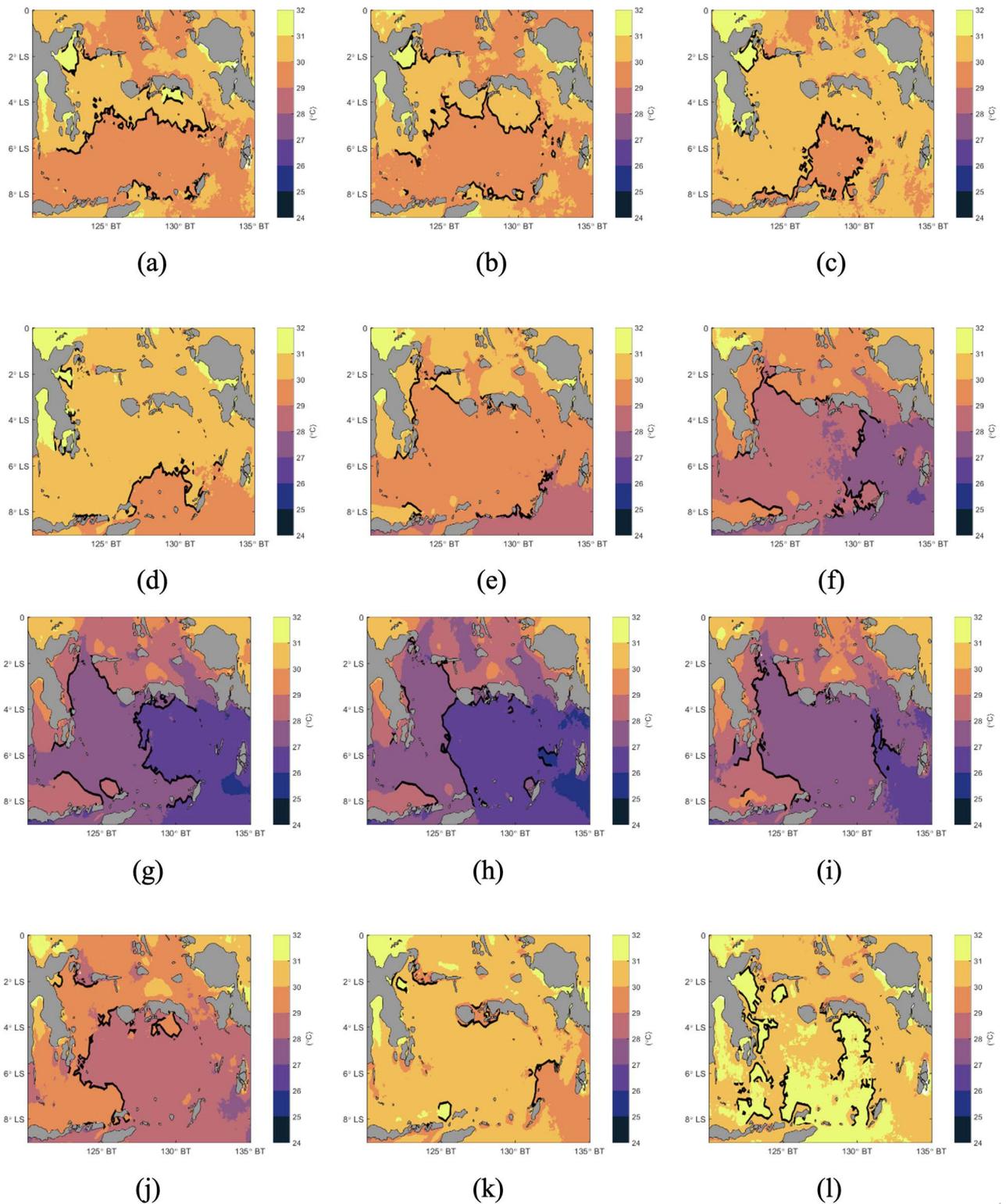
juga dilakukan terhadap data SPL itu sendiri beserta data data konsentrasi klorofil-a, SLA, arus permukaan. Masing - masing data (SPL, klorofil-a, SLA, serta arus permukaan) diolah dalam resolusi temporal bulanan dan klimatologi bulanan. Data – data tersebut dikaji untuk melihat bagaimana karakteristik dari thermal front yang terbentuk di Laut Banda.

Berdasarkan data kuantitatif SPL bulanan yang dirata-ratakan dari tahun 2006 hingga 2020 di Laut Banda, nilai SPL maksimum terjadi pada bulan Desember dengan nilai 30,806°C, sementara nilai SPL minimum terjadi pada bulan Agustus dengan nilai 27,169°C (Gambar 2a). Rata-rata SPL bulanan selama 15 tahun pengamatan di Laut Banda adalah 29,248°C. Analisis bulanan menunjukkan variasi SPL sepanjang tahun di Laut Banda. SPL cenderung lebih tinggi pada periode akhir tahun dan awal tahun, serta lebih rendah pada pertengahan tahun. Nilai maksimum SPL di Laut Banda teridentifikasi pada bulan Desember, sedangkan nilai minimum terjadi pada bulan Agustus.

Konsentrasi klorofil-a tertinggi di Laut Banda tercatat pada bulan Agustus dengan nilai 0,426 mg/m<sup>3</sup>, sedangkan konsentrasi terendah terjadi pada bulan Desember dengan nilai 0,148 mg/m<sup>3</sup> (Gambar



Gambar 2. Rata-rata (a) suhu permukaan laut/SPL dan (b) Klorofil-a , (c) anomali tinggi muka laut/SLA, dan (d) Arus permukaan bulanan klimatologis di Laut Banda (WPPNRI 714)



Gambar 3. *Thermal front* klimatologis bulanan dengan suhu permukaan laut/SPL (a) Januari, (b) Februari, (c) Maret, (d) April, (e) Mei, (f) Juni, (g) Juli, (h) Agustus, (i) September, (j) Oktober, (k) November, (l) Desember

2b). Rata-rata konsentrasi klorofil-a bulanan di Laut Banda selama periode pengamatan adalah 0,237 mg/m<sup>3</sup>. Peningkatan konsentrasi klorofil-a yang signifikan terlihat mulai bulan Juni hingga Oktober, yang diduga berkaitan dengan pasokan nutrisi dari laut dalam melalui proses *upwelling* yang terjadi di Laut Banda pada periode monsun tenggara (Juni-Agustus), seperti yang dinyatakan oleh Wirasatriya dkk. (2021a).

Nilai SLA maksimum di Laut Banda ditemukan pada bulan Februari dengan nilai 0,133 m, sedangkan nilai minimum terjadi pada bulan Agustus dengan nilai 0,003 m (Gambar 2c). Rata-rata SLA bulanan di Laut Banda adalah 0,077 m. Secara umum, SLA di Laut Banda cenderung tinggi pada periode Desember hingga April dan rendah pada periode Mei hingga November, yang sesuai dengan pola yang diamati di wilayah Indonesia timur yang dipengaruhi oleh faktor musim (Sarsito dkk., 2019; Nababan dkk., 2015). Fluktuasi ini diduga dipengaruhi oleh faktor lokal seperti perubahan volume air laut dan gerakan vertikal massa air.

Kecepatan arus permukaan di Laut Banda cenderung lebih tinggi pada periode akhir tahun dan awal tahun, sejalan dengan pola angin monsun Barat Laut yang bertiup dari barat ke timur (Gambar 2d). Sebaliknya, pada periode monsun Tenggara (Juni-Agustus), kecepatan arus cenderung sedikit lebih rendah. Secara keseluruhan, arah arus permukaan di Laut Banda dipengaruhi oleh sistem angin monsun, di mana pada monsun Barat Laut arus bergerak dari barat ke timur, dan pada monsun Tenggara arus bergerak dari timur ke barat.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diketahui bahwa *thermal front* bulanan maksimum

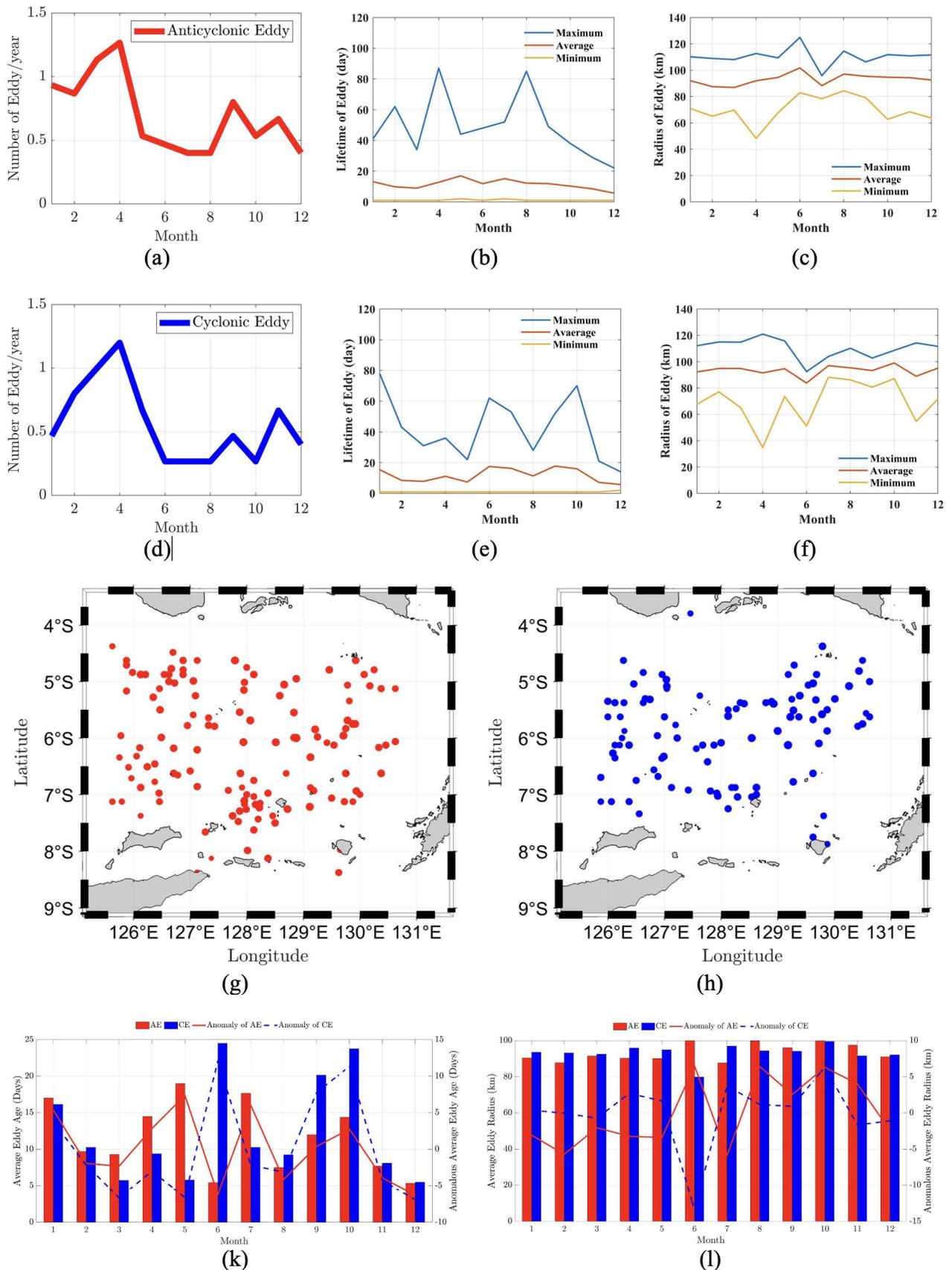
sepanjang tahun 2006-2020 terjadi pada bulan Desember dan minimum pada bulan November baik berdasarkan jumlah piksel ukuran 4x4 km ataupun berdasarkan jumlah poligon. Rata-rata *thermal front* yang terjadi setiap bulan adalah 1385 kejadian (berdasarkan jumlah piksel) dan 17 berdasarkan jumlah poligon.

Jika melihat variasi musiman (Tabel 2), urutan jumlah *thermal front* paling tinggi ke paling rendah ditemukan pada monsun barat laut (DJF), monsun tenggara (JJA), monsun peralihan 1 (MAM), dan monsun peralihan 2 (SON). Kondisi ini sesuai dengan wilayah Laut Banda yang terletak di selatan khatulistiwa, ketika terjadi angin timur maka mendorong proses terbentuknya *upwelling* di wilayah lepas pantai/pusat Laut Banda. Massa air dingin terlihat merambat dari wilayah Laut Arafura yang berperan membentuk *thermal front* di pusat Laut Banda. Sedangkan tingginya *thermal front* yang ditemukan pada bulan Desember hingga Februari tidak disebabkan oleh fenomena *upwelling* melainkan pembentuk *thermal front* lainnya, yang dalam penelitian ini diduga disebabkan oleh arus eddy yang terbentuk secara persisten di monsun tenggara (Gambar 6). *Front* juga dapat terbentuk diakibatkan oleh arus eddy dengan skala waktu pembentukan yang berlangsung harian hingga tahunan bergantung pada lokasi terjadinya *front* (Ginzburg dan Kostianoy, 2009).

Sedangkan pada monsun barat laut, massa air yang berasal dari Laut Jawa, Selat Makassar (yang dipengaruhi Arlindo), Laut Flores bergerak bebas tanpa hambatan ke wilayah Laut Banda (jika melihat topografi laut ini) (Yudowatya dkk., 2025). Pergerakan massa air dengan karakteristik tertentu dari wilayah barat ini kemudian menunjang

Tabel 2. Rata-rata *Thermal front* klimatologis setiap bulan pada wilayah kajian tahun 2006-2020.

Waktu (Bulan)	Jumlah <i>Thermal front</i>	
	Berdasarkan jumlah piksel 4x4 km	Berdasarkan jumlah poligon
Januari	1735	22
Februari	1659	23
Maret	1602	17
April	976	15
Mei	954	12
Juni	1282	15
Juli	1404	9
Agustus	1237	14
September	1310	17
Oktober	1162	17
November	883	9
Desember	2416	29



Gambar 4. (a) Jumlah eddy siklonik (CE) setiap bulan. Nilai maksimum, minimum, dan rerata bulanan (b) umur CE (hari) dan (c) radius CE (km). (d) Distribusi Grafik sebaran eddy antisiklonik (AE) setiap bulan. Nilai maksimum, minimum, dan rerata bulanan (e) umur AE (hari) dan (f) radius AE (km). Distribusi titik pusat (g) AE dan (h) CE. Distribusi radius (g) AE dan (h) CE. Variasi bulanan untuk (k) umur dan (l) radius AE dan CE.

pembentukan *thermal front* di pusat wilayah Laut Banda setelah bertemu massa air lokal pada wilayah laut tersebut.

Secara spasial *thermal front* terlihat selalu terbentuk di wilayah pusat Laut Banda atau setiap bulan pengamatan selalu terdapat fenomena ini dengan panjang dan luas wilayah yang berbeda. Kondisi ini menunjukkan bahwa Laut Banda merupakan salah satu *hot spot* pembentukan *thermal front*. Arus eddy sebagai arus sirkular ditemukan di Laut Banda (Gambar 3) dengan variasi spasial dan temporal tertentu baik jenis AE ataupun CE. Berdasarkan data yang telah diolah selama 15 tahun (2006-2020), ditemukan AE (CE) terbentuk selama 177 bulan (148 bulan) di Laut Banda. Adapun variabilitas amplitudo, radius, energi, serta umur AE dan CE yang terbentuk masing-masing akan diberikan penjelasan di bawah.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4a, total rata-rata AE yang terbentuk setiap tahun sedangkan berdasarkan Gambar 4d untuk CE. CE terlihat memiliki nilai yang tinggi pada bulan Februari hingga April serta minimum pada bulan Juni. Berdasarkan nilai maksimumnya (Gambar 4b), CE paling lama terbentuk pada bulan Januari (78 hari) sedangkan paling singkat terbentuk pada bulan sebelumnya yaitu bulan Desember (kurang dari 14 hari). Radius CE memiliki nilai maksimum tertinggi 120,9 km (bulan April) dan radius minimum tertinggi adalah 92,43 km (bulan Juni). Terdapat perbedaan bulan antara variasi jumlah, lama waktu, serta radius CE yang terbentuk (Gambar 4c). Hal ini diduga disebabkan oleh proses dinamis perairan serta pesisir wilayah kajian yang merupakan teluk yang cukup luas, namun dikelilingi oleh daratan.

Jumlah AE terbentuk memiliki nilai yang lebih besar jika dibandingkan dengan CE. Jumlah AE maksimum terjadi pada bulan Januari hingga April serta memiliki jumlah yang paling rendah pada bulan Juli. Variasi jumlah AE yang terbentuk setiap bulan berada pada rentang 8-35 kejadian. Durasi AE terlama (Gambar 3e) ditemukan pada bulan April berdasarkan nilai maksimum (87 hari) sedangkan durasi minimumnya ditemukan pada bulan Desember (22 hari). Rata-rata radius AE teridentifikasi hampir sama dengan CE (110,414 km untuk AE dan 110,186 km untuk CE), dengan nilai maksimum (minimum) radius AE adalah 124,9 km (95,87 km) dan terjadi pada bulan Juni (Juli). Sedangkan radius maksimum (minimum) CE terjadi pada bulan April (bulan Juni) dengan nilai 120,9 km (92,43 km).

Berdasarkan Gambar 4e rata-rata CE yang terbentuk dari bulan Januari hingga bulan Mei serta dari bulan Juli hingga bulan Desember memiliki persistensi atau umur yang lebih lama jika dibandingkan dengan AE. Umur CE yang terbentuk lebih lama jika dibandingkan dengan umur AE yang lebih tinggi hanya ditemukan pada bulan Juni. Meskipun memiliki frekuensi radius lebih rendah (70-75 km) umur CE akan lebih lama dibandingkan dengan AE yang memiliki umur yang lebih singkat namun memiliki radius yang lebih tinggi (70-80 km) (Gambar 4f).

Gambar 4g - j menunjukkan daerah sebaran sirkulasi arus eddy (AE dan CE) dengan frekuensi radius terbesar bernilai 95 km di Laut Banda berdasarkan metode OB. Terlihat bahwa berdasarkan metode OB sebaran sirkulasi arus eddy AE maupun CE memiliki kecenderungan yang sama. Pola sebaran AE maupun CE terlihat tersebar secara merata di seluruh wilayah laut Banda.

Gambar 4k menunjukkan rata-rata radius eddy bulanan yang terdeteksi pada wilayah kajian. Rerata radius AE yang terbentuk pada Laut Banda adalah 92,999 km dengan anomali positif maksimum ditemukan pada bulan Mei (5,51 km) sedangkan anomali negatif maksimum terjadi pada bulan Desember (-5,752 km). Sedangkan rata-rata radius CE yang terbentuk adalah 93,357 km dengan anomali positif maksimum ditemukan pada bulan September (5,928 km) dan anomali negatif maksimum ditemukan pada bulan Desember (-6,072 km).

Rata-rata umur eddy yang terdeteksi ditunjukkan oleh Gambar 4l. Rata-rata umur eddy yang terdeteksi juga menunjukkan pola musiman yang sesuai dengan jumlah pusat eddy yang terdeteksi. Pengaruh musim menyebabkan adanya pergantian yang seimbang antara sirkulasi arus eddy siklon dan antisisiklon berumur panjang. Hal ini terlihat jelas dari garis anomali yang memiliki nilai berbanding terbalik antara AE dan CE pada musim JJA maupun DJF. Namun, pengaruh umur yang memiliki anomali tinggi terjadi pada saat eddy tersebut (baik AE maupun CE) berada pada musim puncak kejadiannya. Pada saat puncak eddy, umur eddy menjadi lebih panjang 1-2 minggu dari nilai umur rata-rata tahunannya. Umur puncak yang sama antara CE dan AE menunjukkan bahwa keduanya mungkin disebabkan karena pengaruh gaya utama yang sama, yaitu pola musiman angin. Umur dari sirkulasi arus eddy memiliki hubungan dengan radius. Ketika radius eddy lebih besar, eddy cenderung memiliki umur yang lebih panjang namun dengan nilai vortisitas yang lebih kecil.

Tabel 3. Statistik thermal front (TF) di Laut Banda pada wilayah eddy (Berdasarkan Jumlah Piksel 4x4 km)

Bulan	Total TF	TF pada wilayah Eddy	TF bukan pada wilayah Eddy
Januari	1735	0	1735
Februari	1659	0	1659
Maret	1602	138	1464
April	976	29	947
Mei	954	318	636
Juni	1282	258	1024
Juli	1404	218	1186
Agustus	1237	77	1160
September	1310	336	974
Oktober	1162	213	949
November	883	412	471
Desember	2416	0	2416

Berdasarkan Gambar 41 terdeteksi bahwa rerata kejadian AE dan CE yang terbentuk sepanjang tahun bertahan dengan durasi selama 11 hari. Fluktuasi musiman AE paling lama terbentuk pada monsun tenggara (JJA) yaitu selama 13 hari dan paling singkat terbentuk pada monsun barat laut (DJF) yaitu selama 9 hari. Sedangkan variasi musiman CE juga memiliki durasi paling lama pada monsun tenggara (15 hari), namun memiliki durasi paling singkat pada monsun peralihan 1 (8 hari). Anomali durasi AE yang terbentuk memiliki perbedaan waktu dengan CE yang terbentuk. Durasi anomali positif maksimum AE ditemukan pada bulan Mei (5,51 hari) dan durasi anomali negatif maksimum ditemukan pada bulan Desember (-5,752 hari). Sedangkan durasi anomali positif maksimum CE ditemukan pada bulan September (5,928 hari), dengan durasi anomali negatif maksimum terjadi pada bulan Desember (-6,072 hari).

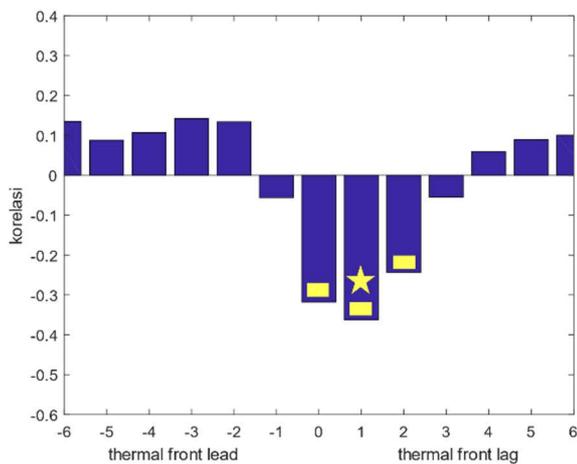
Pola sebaran sirkulasi arus eddy di Laut Banda sangat mengikuti pola musiman (Tabel 3). Keduanya membuktikan bahwa pola sirkulasi arus eddy yang terbentuk di Laut Banda memiliki pola sebaran musiman. Variabilitas spasial dan temporal dari arus eddy dan *thermal front* menunjukkan bahwa *thermal front* dan AE serta CE memiliki relasi yang cukup berhubungan. Hal ini terlihat dari pola musiman selama 20 tahun ketiga parameter tersebut yang menunjukkan bahwa jumlah TF di Laut Banda ditemukan tinggi pada bulan Desember hingga bulan Maret. Pola musiman yang sama juga terjadi pada AE yang tinggi jumlahnya dari bulan Januari hingga April serta CE yang tinggi pada bulan Februari hingga Mei. Berdasarkan pola ini diduga bahwa fenomena TF mendahului pembentukan AE serta CE.

## DISKUSI

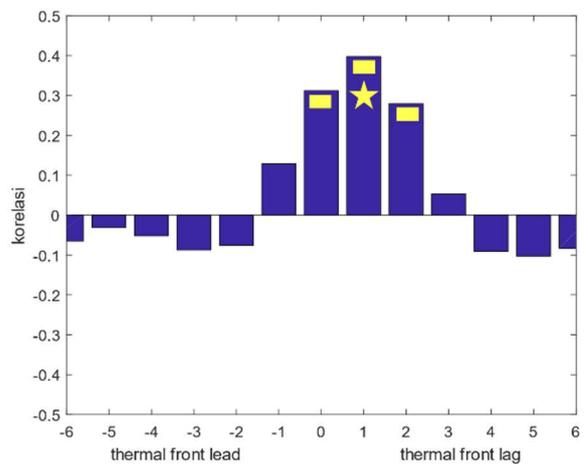
Untuk memahami keterkaitan antara *thermal front* dengan SPL dan konsentrasi klorofil-a di Laut Banda, dilakukan analisis statistik dengan menghitung koefisien korelasi Pearson antara *thermal front* dan kedua parameter tersebut (Gambar 5). Selain menunjukkan hubungan linier, nilai koefisien korelasi juga memberikan indikasi terhadap karakteristik faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan *thermal front* di wilayah ini. Pendekatan *lag-lead correlation* digunakan untuk mengidentifikasi urutan kejadian antar variabel. *Lag* pada *thermal front* menunjukkan bahwa perubahan pada SPL atau klorofil-a terjadi sebelum pembentukan *thermal front*, sedangkan *lead* mengindikasikan bahwa *thermal front* terbentuk lebih dahulu sebelum terjadi perubahan pada SPL atau klorofil-a. Satuan waktu yang digunakan dalam analisis ini adalah bulanan, dan signifikansi statistik ditentukan berdasarkan nilai  $p$  ( $p$ -value) < 0,05.

Hasil korelasi Pearson antara *thermal front* dan SPL bulanan (Gambar 5a) menunjukkan kisaran nilai koefisien antara -0,366 hingga 0,144. Nilai koefisien yang signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ) diperoleh pada kondisi tanpa *lag* (-0,318), *lag* 1 bulan (-0,366), dan *lag* 2 bulan (-0,246). Koefisien tertinggi terjadi pada *lag* 1 bulan dengan nilai -0,366, yang menunjukkan korelasi negatif moderat. Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan SPL satu bulan sebelumnya berasosiasi dengan peningkatan kejadian *thermal front* pada bulan berikutnya.

Sementara itu, korelasi antara *thermal front* dan konsentrasi klorofil-a menunjukkan kisaran nilai antara -0,107 hingga 0,400 (Gambar 5b). Tiga nilai



(a)



(b)

Gambar 5. Korelasi antara (a) SPL dan (b) Klorofil-a dengan thermal front di Laut Banda. Kotak kuning menunjukkan nilai koefisien yang memiliki nilai  $p$ -value < 0,05, sedangkan bintang kuning menunjukkan nilai koefisien

korelasi yang signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ) ditemukan pada kondisi tanpa lag (0,312), lag 1 bulan (0,400), dan lag 2 bulan (0,282). Koefisien tertinggi tercatat pada lag 1 bulan dengan nilai 0,400, menunjukkan korelasi positif yang cukup kuat. Hal ini menyiratkan bahwa peningkatan konsentrasi klorofil-a satu bulan sebelumnya cenderung diikuti oleh peningkatan pembentukan *thermal front* pada bulan berikutnya. Temuan ini mendukung dugaan bahwa perairan kaya nutrisi yang mendukung pertumbuhan fitoplankton (yang direpresentasikan oleh tingginya klorofil-a) turut berperan dalam pembentukan atau intensifikasi *thermal front* di wilayah ini.

Fenomena arus sejajar pantai di wilayah ini dapat memicu *Ekman pumping*, yang bersama dengan keberadaan arus eddy menyebabkan munculnya massa air yang lebih dingin ke permukaan. Variasi spasial *thermal front* yang ditampilkan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa sebagian besar *thermal front* terbentuk di wilayah yang dilalui oleh *anticyclonic eddy* (AE), *cyclonic eddy* (CE), serta di sekitar daerah yang memiliki kecepatan arus geostropik tinggi. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa *thermal front* cenderung lebih intens terjadi pada bulan Desember hingga Maret, sejalan dengan meningkatnya jumlah pembentukan AE dan CE berdasarkan data klimatologis bulanan.

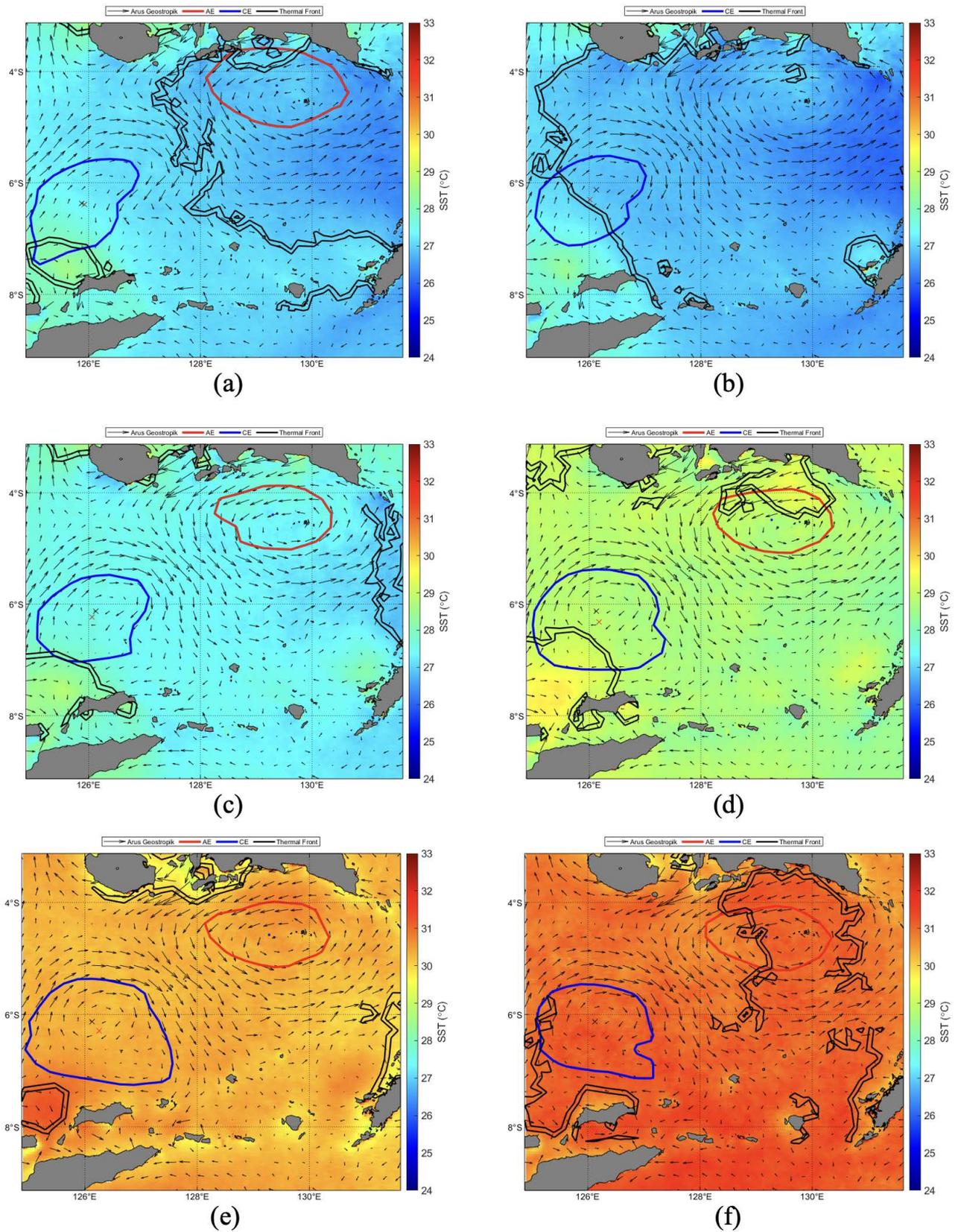
Lukman dkk. (2022) mengindikasikan adanya hubungan antara arus eddy dan *upwelling* terhadap pembentukan *thermal front*. Laut Banda merupakan salah satu wilayah yang secara konsisten mengalami pembentukan *thermal front*, serta merupakan area aktif terjadinya arus eddy dan *upwelling* di perairan Indonesia bagian tengah dan timur. Oleh karena itu,

analisis deskriptif mengenai hubungan antara dinamika oseanografi tersebut dan pembentukan *thermal front* sangat relevan untuk dilakukan.

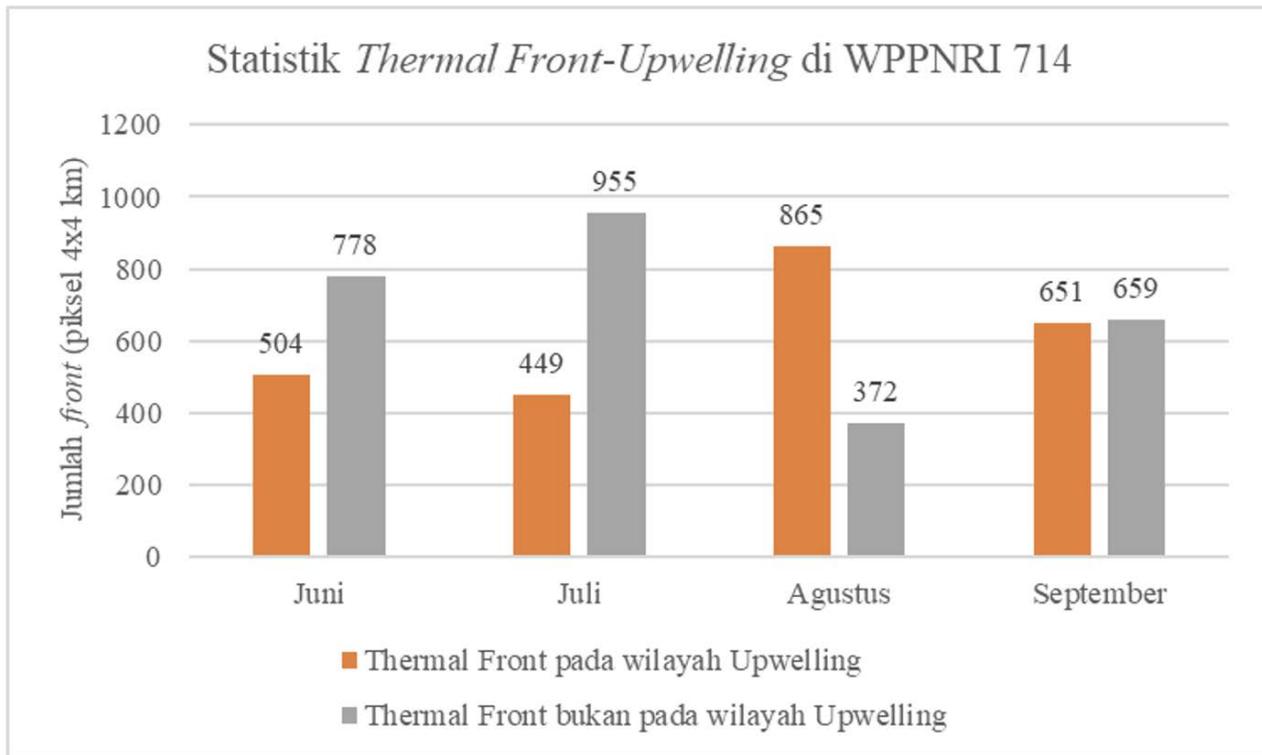
Berdasarkan data arus permukaan klimatologis bulanan dari tahun 2006 hingga 2020, teridentifikasi bahwa arus eddy di Laut Banda mulai terbentuk pada bulan Oktober hingga November. Arus eddy yang berkembang di wilayah ini umumnya memiliki karakteristik morfologi AE dan CE.

Gambar 7 menyajikan jumlah *thermal front* klimatologis yang terbentuk di wilayah *upwelling* dan wilayah *non-upwelling*. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada bulan Agustus, jumlah *thermal front* yang terbentuk di wilayah *upwelling* lebih tinggi dibandingkan di wilayah lainnya. Kontribusi *thermal front* yang terbentuk di wilayah *upwelling* terhadap total kejadian *thermal front* di Laut Banda mencapai 39,314% pada Juni, 31,980% pada Juli, 69,927% pada Agustus, dan 49,695% pada September, dengan rata-rata 47,729% sepanjang periode tersebut.

Temuan ini mengindikasikan bahwa secara spasial, lokasi terjadinya *upwelling* di Laut Banda memiliki keterkaitan erat dengan pembentukan *thermal front*. Terutama pada bulan Agustus, *upwelling* tampaknya memainkan peran dominan dalam memicu terbentuknya *thermal front*. Fenomena ini dikenal sebagai *upwelling front*, yaitu zona transisi termal yang sering dikaitkan dengan tingginya produktivitas biologi laut. Kombinasi *thermal front* dan *upwelling* di Laut Banda diduga berkontribusi besar terhadap tingginya biomassa fitoplankton dan keragaman hayati, yang pada akhirnya mendukung produktivitas perikanan di wilayah ini (Napitupulu, 2024).



Gambar 6. Arus Geostropik, CE, AE, dan Thermal front pada bulan (a) Juli, (b) Agustus, (c) September, (d) Oktober, (e) November, (f) Desember



Gambar 7. Jumlah thermal front klimatologis di WPPNRI 714 yang terbentuk pada wilayah upwelling dan bukan wilayah non upwelling

## KESIMPULAN

Arus sejajar pantai mengakibatkan fenomena *Ekman Pumping*. *Ekman Pumping* dan arus eddy mengakibatkan naiknya massa air yang bersuhu rendah ke permukaan, sehingga memicu terbentuknya *thermal front* dan banyak ditemukan terjadi di Laut Banda. Rata-rata *thermal front* yang terbentuk sejak tahun 2006 hingga tahun 2020 di Laut Banda adalah 1385 kejadian (berdasarkan jumlah piksel) dan 17 berdasarkan jumlah poligon dengan jumlah maksimum ditemukan pada bulan Desember dengan nilai 2416 kejadian dan minimum pada bulan November kejadian dengan nilai 883 kejadian. *Ekman Pumping* dan arus eddy ditemukan dengan durasi 11,419 hari untuk AE serta 11,812 hari untuk CE. Fenomena *Ekman Pumping* dan arus eddy mengakibatkan penurunan SPL, peningkatan konsentrasi klorofil-a permukaan laut, serta penurunan tinggi muka laut.

## DAFTAR ACUAN

- Ahmad, A. L., Syamsuddin, M. L., Purba, N. P., & Sunarto. (2019). *Thermal front* condition through El Niño and Indonesian throughflow phase in southern sea of East Java and Bali on the east monsoon. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012002>
- Belkin, I. M. (2021). Remote Sensing of Ocean Fronts in Marine Ecology and Fisheries. *Remote Sensing 2021*, Vol. 13, Page 883, 13(5), 883. <https://doi.org/10.3390/RS13050883>
- Belkin, I. M., & O'Reilly, J. E. (2009). An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. *Journal of Marine Systems*, 78(3), 319–326. <https://doi.org/10.1016/J.JMARSYS.2008.11.018>
- Cayula, J.-F., & Cornillon, P. (1992). Edge Detection Algorithm for SST Images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9(1), 67–80. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1992\)009](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1992)009)
- Hamzah, R., Prayogo, T., & Harsanugraha, W. K. (2014). Identifikasi *thermal front* dari data satelit Terra/Aqua MODIS menggunakan metode Single Image Edge Detection (SIED)(Studi kasus: Perairan utara dan selatan Pulau Jawa). *Prosiding Seminar Nasional Penginderaan Jauh 2014*, 552–559.
- Hanintyo, R., Hadiani, S., Mahardhik, R. M. P., Aldino, J. S., & Islamy, F. (2015). Sebaran

- musiman kejadian *thermal front* berdasarkan citra Aqua-MODIS di WPPRI 714, 715 dan 716. Prossiding. Seminar Nasional Penginderaan Jauh.
- Jatiandana, A. P., & Nurdjaman, S. (2020). Identification of *thermal front* in Indonesian Waters during 2007–2017. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 618(1), 12039. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/618/1/012039>
- Jatisworo, D., & Murdimanto, A. (2013). Identifikasi *thermal front* di selat Makassar dan laut banda. Prosiding Simposium Nasional Sains Geoinformasi III.
- Jishad, M., & Agarwal, N. (2022). *Thermal front* Detection Using Satellite-Derived Sea Surface Temperature in the Northern Indian Ocean: Evaluation of Gradient-Based and Histogram-Based Methods. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 50(7), 1291–1299. <https://doi.org/10.1007/S12524-022-01527-6/METRICS>
- Jishad, M., Sarangi, R. K., Ratheesh, S., Ali, S. M., & Sharma, R. (2021). Tracking fishing ground parameters in cloudy region using ocean colour and satellite-derived surface flow estimates: A study in the Bay of Bengal. Journal of Operational Oceanography, 14(1), 59–70. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1658566>
- Karima, S., Ningsih, N. S., Tisiana, A. R., & Napitupulu, G. (2025). Water Mass Vertical Mixing in The Sulawesi Sea and Makassar Strait During the Second Transition Monsoon. *Earth and Planetary Science*, 4(1), 73-88. <https://doi.org/10.36956/eps.v4i1.2061>
- Lukman, A. A., Tarya, A., & Pranowo, W. S. (2022). Surface *Thermal front* Persistence in Malacca Strait. Jurnal Ilmiah PLATAX, 10(2), 239–250. <https://doi.org/10.35800/jip.v10i2.40879>
- Lutjeharms, J. R. E. dan Stockton, P. L. (1987): Kinematics of the *upwelling front* off southern Africa, *South African Journal of Marine Science*, 5, 35-49.
- Mustasim, M., Zainuddin, M., & Safruddin, S. (2015). Thermal Dan Klorofil-A Front Hubungannya Dengan Hasil Tangkapan Ikan Cakalang Pada Musim Peralihan Barat-Timur Diperairan Seram. Jurnal IPTEKS Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, 2(4). <https://doi.org/10.20956/jipsp.v2i4.1896>
- Napitupulu, G. (2024). Monthly variability of wind-induced upwelling and its impact on chlorophyll-a distribution in the Southern and Northern parts of the Indonesian Archipelago. *Ocean Dynamics*, 74(10), 859-878. <https://doi.org/10.1007/s10236-024-01640-9>
- Napitupulu, G. (2025). Eddy-induced modulation of marine heatwaves and cold spells in a tropical region: a case study in the natuna sea area. *Ocean Dynamics*, 75(3), 28. <https://doi.org/10.1007/s10236-025-01673-8>
- Napitupulu, G., Fekranie, N. A., Millina, A. V., Putri, M. R., Kartadikaria, A. R., Setiawan, A., ... & Fajary, F. R. (2025). Seasonal Variability of Surface Heat Transport in the Banda Sea. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 41(2), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s41208-025-00840-4>
- Napitupulu, G., Lukman, A. A., Hatmaja, R. B., Kartadikaria, A. R., Radjawane, I. M., Millina, A. V., ... & Napitupulu, M. (2024). Respon Singkat Konsentrasi Klorofil-A Terhadap Perubahan Arus Eddy Permukaan di Wilayah Perairan Teluk Tolo dan Sekitarnya. *Jurnal Geologi Kelautan*, 22(1). <http://dx.doi.org/10.32693/jgk.22.1.2024.877>
- Panggabean, S., Mubarak, M., & Ghalib, M. (2018). Penentuan Daerah *Thermal front* Di Laut Timur Su-matera Provinsi Riau. Jurnal Perikanan Dan Kelautan, 23(1), 8–14.
- Park, J. E., Park, K. A., Kang, C. K., & Park, Y. J. (2020). Short-Term Response of Chlorophyll-a Concentration to Change in Sea Surface Wind Field over Mesoscale Eddy. *Estuaries and Coasts*, 43(3), 646–660. <https://doi.org/10.1007/S12237-019-00643-W/FIGURES/10>
- Park, K. A., Cornillon, P., & Codiga, D. L. (2006). Modification of surface winds near ocean fronts: Effects of Gulf Stream rings on scatterometer (QuikSCAT, NSCAT) wind observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C3), 3021. <https://doi.org/10.1029/2005JC003016>
- Ramadhan, M. F., Sugianto, D. N., Wirasatriya, A., Setiyono, H., & Maslukah, L. (2020). Characteristics of Halmahera Eddy and its relation to sea surface temperature, chlorophyll-a, and thermocline layer. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 530, No. 1, p. 012039). IOP

- Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/530/1/012039>
- Rintaka, W. E. (2015). Analisis seasonal suhu permukaan laut (SPL), *thermal front* dan klorofil a terhadap jumlah tangkapan skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) di Perairan Utara Maluku-Papua. Seminar Nasional Tahunan XII Hasil Penelitian Perikanan Dan Kelautan.
- Rohima Daulay, S., Ersti Yulika Sari, T., Usman, U., Jhonnerie Jurusan Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, R., & Perikanan dan Kelautan Universitas Riau, F. (2019). Characteristics of *Thermal front* in the Tropical Waters of Eastern Indian Ocean. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 21(1), 25–29. <https://doi.org/10.22146/JFS.39724>
- Safruddin, Aswar, B., Rijal Ashar, M., Hidayat, R., Dewi, Y. K., Umar, M. T., Farhum, S. A., Mallawa, A., & Zainuddin, M. (2019). The Fishing Ground of Large Pelagic Fish during the Southeast Monsoon in Indonesian Fisheries Management Area-713. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 370(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/370/1/012045>
- Small, R. J., deSzoek, S. P., Xie, S. P., O'Neill, L., Seo, H., Song, Q., Cornillon, P., Spall, M., & Minobe, S. (2008). Air–sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3–4), 274–319. <https://doi.org/10.1016/J.DYNATMOCE.2008.01.001>
- Stern, M. E. (1965). Interaction of a uniform wind stress with a geostrophic vortex. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 12(3), 355–367. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(65\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0011-7471(65)90007-0)
- Suhadha, A. G., & Ibrahim, A. (2020). Association Study Between Thermal Front Phenomena and Bali Sardinella Fishing Areas in Bali Strait. *Indonesian Journal of Geography*, 52(2), 154–162. <https://doi.org/10.22146/IJG.51668>
- Trinugroho, T., Satriadi, A., & Muslim, M. (2019). Sebaran *thermal front* musiman di wilayah perairan Selat Madura menggunakan single image edge detection. *Journal of Marine Research*, 8(4), 416–423. <https://doi.org/10.14710/jmr.v8i4.24815>
- Vinayachandran, P. N. M., Masumoto, Y., Roberts, M. J., Huggett, J. A., Halo, I., Chatterjee, A., Amol, P., Gupta, G. V. M., Singh, A., Mukherjee, A., Prakash, S., Beckley, L. E., Raes, E. J., & Hood, R. (2021). Reviews and syntheses: Physical and biogeochemical processes associated with upwelling in the Indian Ocean. *Biogeosciences*, 18(22), 5967–6029. <https://doi.org/10.5194/BG-18-5967-2021>
- Wang, G., Li, J., Wang, C., & Yan, Y. (2012). Interactions among the winter monsoon, ocean eddy and ocean thermal front in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C8). <https://doi.org/10.1029/2012JC008007>
- Ye, H., Kalhor, M. A., Morozov, E., Tang, D., Wang, S., & Thies, P. R. (2018). Increased chlorophyll-a concentration in the South China Sea caused by occasional sea surface temperature fronts at peripheries of eddies. *International Journal of Remote Sensing*, 39(13), 4360–4375. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1399479>
- Yudowaty, S.O., Radjawane, I.M., Fajary, F.R., Napitupulu, G. (2025). Heat Transport Variability within The Inlet and Outlet of Makassar Strait. *Malaysian Applied Geography (MAGG)*, 3(1): 38-44. <https://doi.org/10.26480/magg.01.2025.38.44>
- Zhao, D., Xu, Y., Zhang, X., & Huang, C. (2021). Global chlorophyll distribution induced by mesoscale eddies. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112245. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112245>