

## Dinamika Spasial dan Temporal Gelombang Panas Laut di Selat Karimata Sebagai Respons Terhadap Anomali Iklim Ekstrem

Muhamad Nur<sup>1\*</sup>, Ellis Nurjuliasti Ningsih<sup>1</sup>, Redho Yoga Nugroho<sup>1</sup>, Risnita Tri Utami<sup>1</sup>,  
Qurnia Wulan Sari<sup>2</sup>, Hiskia Abel Perdana Ardi<sup>3,4</sup>, Alfianu Adhi Riztiawan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya  
Jl. Palembang-Prabumulih, KM 32 Indralaya, 30862, Sumatera Selatan

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

<sup>3</sup>Program Sarjana Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran

<sup>4</sup>Program Magister Konservasi Laut, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran  
Jalan Raya Bandung-Sumedang KM.21 Jatinangor Sumedang Jawa Barat Indonesia.

Email: \*muhamad\_nur@mipa.unsri.ac.id

### Abstrak

Gelombang Panas Laut (GPL) merupakan fenomena ekstrem yang frekuensi, durasi, dan intensitasnya meningkat sebagai respons terhadap pemanasan global akibat aktivitas antropogenik. Selat Karimata, sebagai wilayah strategis dalam sistem lintas laut Indonesia, sangat rentan terhadap anomali termal ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik spasial dan temporal GPL di perairan Selat Karimata selama periode 1992-2024. Analisis dilakukan menggunakan data Suhu Permukaan Laut (SPL) harian resolusi tinggi dari *Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis* (OSTIA). Deteksi kejadian GPL dilakukan dengan pendekatan ambang klimatologis berbasis persentil ke-90, dengan durasi minimum lima hari berturut-turut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Selat Karimata mengalami rata-rata 2-3 kejadian GPL per tahun dengan durasi sekitar 10 hari dan intensitas maksimum mencapai 1,34 °C di atas ambang klimatologis. Temuan utama menunjukkan adanya tren peningkatan durasi GPL yang signifikan sebesar 11,5 hari per dekade, serta peningkatan frekuensi sebesar 1,1 kejadian per dekade. Secara temporal, kejadian GPL terpanjang dan terkuat terjadi pada tahun 1998 dan 2016, yang berkorelasi erat dengan fenomena El Niño kuat. Secara spasial, wilayah selatan Selat Karimata menunjukkan intensitas dan durasi yang lebih tinggi dibandingkan wilayah utara. Selain itu, kejadian GPL berdurasi panjang dan berintensitas tinggi lebih dominan di wilayah pesisir dan laut semi-tertutup. Peningkatan signifikan pada parameter GPL ini mengindikasikan tekanan termal yang semakin besar pada ekosistem laut di Selat Karimata. Temuan ini menegaskan bahwa Selat Karimata merupakan wilayah yang rentan terhadap tekanan termal laut, dengan implikasi signifikan terhadap ekosistem pesisir dan pengelolaan perikanan (WPPNRI) 711 dalam menghadapi risiko perubahan iklim di masa depan.

**Kata kunci :** ENSO, Gelombang Panas Laut, Selat Karimata, Suhu Permukaan Laut, Variabilitas Iklim

### Abstract

#### *Spatiotemporal Dynamics of Marine Heatwaves in the Karimata Strait in Response to Extreme Climate Anomalies*

*Marine Heatwaves (MHWs) are extreme phenomena whose frequency, duration, and intensity are increasing in response to anthropogenic global warming. The Karimata Strait, as a strategic area within the Indonesian Throughflow system, is highly vulnerable to these thermal anomalies. This study aims to analyze the spatial and temporal characteristics of MHWs in the Karimata Strait during the period 1992-2024. Analysis was conducted using high-resolution daily Sea Surface Temperature (SST) data from the Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA). MHWs detection utilized a 90th percentile climatological threshold approach, with a minimum duration of five consecutive days. The results indicate that the Karimata Strait experiences an average of 2-3 MHW events annually, with durations of approximately 10 days and maximum intensities reaching 1.34°C above the climatological threshold. The main findings reveal significant increasing trends in MHWs duration at 11.5 days per decade, as well as an increase in frequency of 1.1 events per decade. Temporally, the longest and strongest MHWs events occurred in 1998 and 2016, closely correlated with strong*

*El Niño* phenomena. Spatially, the southern Karimata Strait exhibits higher intensity and duration compared to the northern region. Furthermore, long-duration and high-intensity MHWs are more dominant in coastal areas and semi-enclosed seas. These significant increases in MHW parameters indicate increasing thermal stress on marine ecosystems in the Karimata Strait. These findings confirm that the Karimata Strait is a region vulnerable to marine thermal stress, with significant implications for coastal ecosystems and fisheries management (WPPNRI 711) in facing future climate change risks.

**Keywords:** Climate Variability, ENSO, Karimata Strait, Marine Heatwaves, Sea Surface Temperature

## PENDAHULUAN

Dampak pemanasan global akibat antropogenik yang semakin meningkat dalam waktu beberapa dekade terakhir dikarenakan kenaikan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer (Solomon *et al.*, 2009). Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa pemanasan global yang disebabkan oleh gas emisi, khususnya karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hampir tidak dapat dihentikan selama lebih dari 1.000 tahun, bahkan jika gas emisi berhenti (Matthews & Caldeira, 2008; Solomon *et al.*, 2009). Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer akibat aktivitas manusia memerangkap panas dan mengakibatkan perubahan besar-besaran pada sistem iklim. Akibatnya, energi yang keluar dari sistem bumi tidak seimbang dengan radiasi matahari yang masuk, di mana lebih dari 90% panas berlebih tersebut diserap oleh lautan, sehingga memicu pemanasan samudera yang signifikan dan berkelanjutan (Cheng *et al.*, 2022; Wijffels *et al.*, 2016).

Gelombang Panas Laut (GPL) atau yang biasa disebut dengan *Marine Heatwaves* (MHWs) merupakan periode anomali suhu laut melebihi ambang batas yang berlangsung setidaknya selama 5 hari (Hobday *et al.*, 2016). Frekuensi, durasi, serta intensitasnya terus meningkat seiring pemanasan iklim global (Oliver *et al.*, 2018, 2021). Kejadian ini telah memicu berbagai fenomena ekstrem di lautan dan menjadi ancaman serius bagi ekosistem pesisir maupun laut dalam. Dampak biologis GPL bersifat destruktif, termasuk pemutihan karang massal (*mass coral bleaching*) yang merusak struktur terumbu karang dan keanekaragaman hayati yang bergantung padanya (Hughes *et al.*, 2018). Selain itu, GPL mengubah distribusi dan kelimpahan ikan secara drastis, memicu perpindahan spesies ke wilayah yang lebih dingin, mengganggu rantai makanan, dan menurunkan hasil tangkapan perikanan sehingga mengancam ketahanan pangan masyarakat pesisir (Smale *et al.*, 2019). Dengan lebih dari 90% panas berlebih akibat emisi gas rumah kaca diserap oleh lautan (Li *et al.*, 2023), kajian mengenai karakteristik GPL dan dampaknya menjadi prioritas penting dalam riset oseanografi modern.

GPL menimbulkan dampak ekologis yang signifikan, di antaranya peningkatan intensitas curah hujan, kenaikan muka laut, degradasi terumbu karang, penurunan kadar oksigen terlarut di laut, kematian massal invertebrata bentik (Garrabou *et al.*, 2009), serta hilangnya ekosistem padang lamun (Marbà & Duarte, 2010). Secara global, peristiwa pemutihan karang berskala besar yang terjadi pada tahun 1998, 2010, dan periode 2014-2017 berkorelasi kuat dengan kondisi El Niño dan peningkatan Suhu Permukaan Laut (SPL) secara luas (Eakin *et al.*, 2019). Dampak ekonomi dari GPL juga sangat nyata, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian Fezzi *et al.* (2023) yang melaporkan kerugian hingga USD 25 juta per tahun di wilayah Maui, Hawaii, akibat pemutihan sekitar 60% tutupan terumbu karang pada tahun 2014-2015.

Di Indonesia, GPL tidak hanya berdampak pada ekosistem laut, tetapi juga menimbulkan konsekuensi sosial ekonomi yang serius. Studi oleh Habibullah *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kejadian GPL berkontribusi terhadap penurunan produktivitas sektor perikanan tangkap, dengan estimasi penurunan hasil tangkapan mencapai 150 ribu metrik ton dibandingkan tahun-tahun sebelumnya, yang berdampak langsung terhadap mata pencaharian masyarakat pesisir. Hal ini menegaskan bahwa GPL merupakan tekanan iklim yang bersifat lintas sektor dan berpotensi memperbesar kerentanan sosial ekonomi wilayah pesisir. Secara keseluruhan, GPL dapat memicu dampak ekologis, ekonomi, dan sosial yang signifikan secara individual (Ummenhofer *et al.*, 2017). Dampak tersebut berpotensi menjadi jauh lebih parah ketika GPL terjadi bersamaan dengan kejadian pemanasan ekstrem lainnya di daratan, seperti gelombang panas dan kekeringan, yang semakin sering terjadi seiring dengan tren pemanasan global yang berkelanjutan. Fenomena GPL ini berimplikasi besar terhadap produktivitas perikanan dan kesehatan ekosistem laut, termasuk di perairan barat Indonesia seperti Selat Karimata, yang berperan dalam mendistribusikan massa air hangat dari Laut Cina Selatan ke Laut Jawa. Studi oleh Ningsih *et al.* (2025) menunjukkan bahwa perubahan transport panas laut dan melemahnya upwelling musiman berkontribusi pada peningkatan intensitas dan frekuensi GPL di perairan

Indonesia bagian barat, yang dapat memicu pemutihan karang, menurunkan stok ikan pelagis, dan memengaruhi rantai makanan laut.

Berbagai penelitian telah mengkaji karakteristik GPL di perairan Indonesia untuk memahami mekanisme pengontrolnya, mulai dari pengaruh fase *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) dan fluks panas permukaan (Beliyana *et al.*, 2023), hingga studi regional di perairan selatan Jawa (Riztiawan *et al.*, 2025), Selat Sunda (Anggraeni *et al.*, 2025), dan pesisir utara Jawa (Wulansari *et al.*, 2026). Analisis *heat budget* oleh Ningsih *et al.* (2025) menunjukkan bahwa adveksi panas menjadi pendorong utama GPL di wilayah barat Sumatera dan selatan Jawa, sementara proses *entrainment* lebih dominan di wilayah lain. Namun demikian, kajian komprehensif.

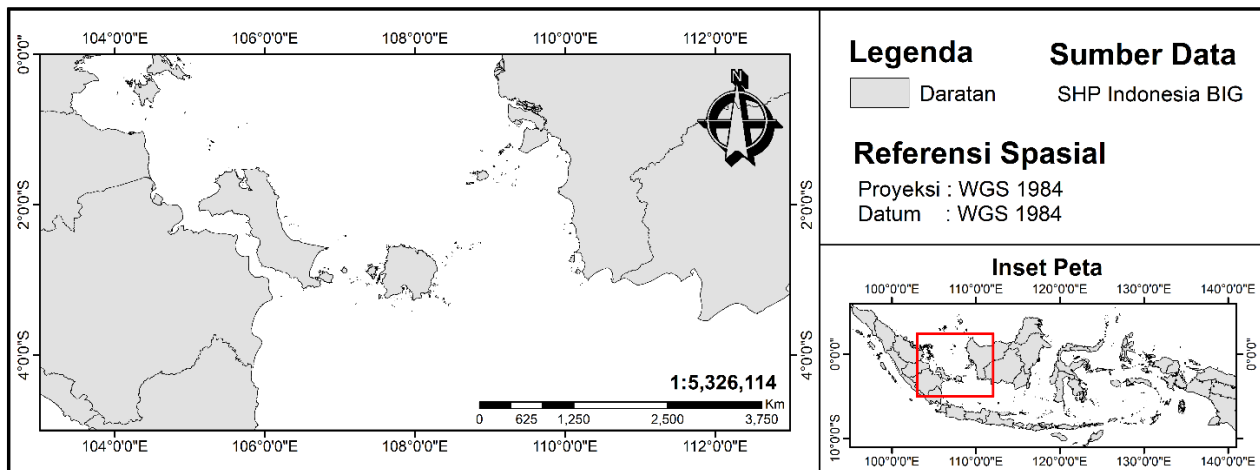
Penelitian ini mengidentifikasi dinamika spasial-temporal GPL di Selat Karimata masih terbatas, padahal wilayah ini memiliki karakteristik unik sebagai jalur strategis *Indonesian Throughflow* (ITF) yang menghubungkan Laut Natuna/Laut Cina Selatan dengan Laut Jawa, serta dipengaruhi kuat oleh sistem monsun dan kondisi perairan dangkal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika spasial-temporal GPL di Selat Karimata menggunakan data OSTIA resolusi tinggi ( $0,05^\circ$ ) dengan periode panjang (1992-2024), yang memungkinkan penangkapan variabilitas lokal pesisir yang sering terlewatkan oleh data resolusi rendah. Hasil analisis diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman mengenai distribusi dan tren GPL, tetapi juga mengidentifikasi area rentan terhadap dampak ekologis, serta berimplikasi strategis bagi pengelolaan perikanan tangkap di WPPNRI 711 melalui pengaturan waktu penangkapan, pengembangan strategi adaptasi berbasis variabilitas iklim, dan penguatan sistem peringatan dini.

## MATERI DAN METODE

Wilayah kajian atau *Area of Interest* (AOI) dalam penelitian ini terletak di perairan Selat Karimata, dengan batas geografis antara  $0^\circ$  hingga  $5^\circ$  LS dan  $103^\circ$  hingga  $113^\circ$  BT (Gambar 1). Secara geografis, wilayah ini memisahkan Pulau Sumatera bagian timur dan Pulau Kalimantan bagian barat, serta berfungsi sebagai jalur laut strategis yang menghubungkan Laut Natuna di utara dengan Laut Jawa di selatan, menjadikannya salah satu koridor penting dalam sistem ITF (Wang *et al.*, 2019). Dinamika hidrodinamikanya dipengaruhi oleh sirkulasi monsun yang mengatur pola arus, salinitas, dan SPL secara musiman (Iskandar *et al.*, 2021). Secara ekologis, efek pemanasan laut ini berinteraksi dengan pola arus lokal di Selat Karimata yang menunjukkan fluktuasi kuat antara musim timur dan barat (Yuliardi *et al.*, 2025), sehingga menciptakan kondisi oseanografi yang sangat dinamis dan rentan terhadap dampak perubahan iklim laut tropis. Dataset SPL yang digunakan mencakup rentang waktu 33 tahun, yaitu dari 1 Januari 1992 hingga 31 Desember 2024. Pemilihan periode analisis utama menggunakan rentang waktu pada 1992-2024, karena telah memenuhi standar minimum 30 tahun untuk analisis klimatologi sebagaimana direkomendasikan oleh *World Meteorological Organization* (WMO, 2017), sekaligus memastikan konsistensi sensor dan algoritma yang digunakan dalam penyusunan data OSTIA. Rentang waktu tersebut juga mencakup beberapa kejadian ekstrem utama yang relevan dalam konteks variabilitas iklim laut.

Data harian *Operational SST and Sea Ice Analysis* (OSTIA) dengan resolusi spasial tinggi sebesar  $0.05^\circ$  (Donlon *et al.*, 2012) diperoleh dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) dan diakses melalui laman resmi produk [https://data.marine.copernicus.eu/product/SST\\_GLO\\_SST\\_L4\\_NRT\\_OBSERVATIONS\\_010\\_001/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001/description). Deret waktu SPL untuk wilayah kajian dihasilkan melalui perhitungan rerata spasial yang mencakup seluruh AOI. Data SPL ini digunakan sebagai dataset utama dalam analisis GPL, termasuk untuk penentuan nilai klimatologis serta pendeteksian kejadian GPL dan perhitungan karakteristiknya, seperti frekuensi, durasi, dan intensitas maksimum. Pemanfaatan data berbasis satelit dipilih karena memiliki konsistensi spasial dan temporal yang tinggi, resolusi temporal harian, serta cakupan wilayah yang luas, sehingga sangat sesuai untuk analisis variabilitas SPL dan identifikasi kejadian ekstrem dalam skala regional hingga global, sementara data in-situ di perairan Selat Karimata masih sangat terbatas secara spasial dan temporal, sehingga sulit untuk menganalisis tren jangka panjang.

GPL pada penelitian ini dideteksi menggunakan pendekatan ambang berbasis klimatologi yang mempertimbangkan variabilitas musiman (WMO, 2017). Klimatologi diturunkan dari data SPL harian selama periode 30 tahun. Menurut Perkins & Alexander (2013) dan Hobday *et al.* (2016), GPL didefinisikan sebagai periode ketika SST harian melebihi persentil ke-90 dari klimatologi lokal, serupa dengan deteksi gelombang panas atmosfer. Untuk kejadian yang lebih ekstrem, ambang persentil lebih tinggi, seperti persentil ke-99, dapat digunakan (Frölicher *et al.*, 2018; Schaeffer & Roughan, 2017).



**Gambar 1.** Peta perairan Selat Karimata

GPL diidentifikasi sebagai periode ketika SPL harian berada di atas ambang setidaknya selama 5 hari berturut-turut. Dua kejadian yang terpisah kurang dari 3 hari dianggap sebagai 1 kejadian. Deteksi dan analisis dilakukan menggunakan MATLAB *toolbox* (Zhao & Marin, 2019) yang memungkinkan deteksi GPL pada setiap grid spasial, visualisasi kejadian, serta perhitungan rerata tahunan, frekuensi, durasi, dan intensitas maksimum. Parameter yang dianalisis meliputi durasi (jumlah hari dari awal hingga akhir setiap kejadian GPL dan intensitas maksimum (anomali SPL maksimum selama kejadian). Deret waktu dari rerata tahunan durasi, intensitas maksimum tahunan, dan frekuensi kejadian dihitung. Karena keterbatasan pengukuran in-situ, penelitian ini sepenuhnya bergantung pada data satelit SPL untuk deteksi GPL, sejalan dengan studi sebelumnya (Carvalho *et al.*, 2021; Mawren *et al.*, 2022; Miyama *et al.*, 2021).

Deteksi GPL akan dilakukan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Hobday *et al.* (2016). Metode ini melibatkan perhitungan ambang batas (persentil ke-90) dari SPL harian selama periode dasar 30 tahun dan identifikasi kejadian di mana SPL melampaui ambang batas selama setidaknya 5 hari berturut-turut. Nilai MHWs diperoleh melalui perhitungan rata-rata klimatologis SPL. Rata-rata klimatologis tersebut didefinisikan seperti yang disajikan pada persamaan berikut:

$$Tm_{(j)} = \frac{1}{11(ye - ys + 1)} \sum_{y=ys}^{ye} \sum_{d=j-5}^{d=j+5} T_{(y,d)}$$

Suhu, yang dinotasikan sebagai  $T$ , didefinisikan sebagai fungsi waktu  $t$ ,  $T(t)$ , dan sebagai fungsi tahun ( $y$ ) serta hari dalam setahun ( $d$ ),  $T(y,d)$ .  $Tm$  adalah rata-rata klimatologis, yang dihitung berdasarkan periode referensi, dimana semua nilai bersifat relatif. Nilai rata-rata klimatologi suhu direpresentasikan sebagai  $Tm$ , yang digunakan untuk mendefinisikan nilai ambang batas musiman untuk GPL dianalisis menggunakan persamaan berikut:

$$T90_{(j)} = P90_{(x)}$$

Karakteristik GPL yang akan dianalisis meliputi, Frekuensi, Durasi, Intensitas Maksimum, Intensitas Rata-rata, dan Luas Area Terdampak. Hasil deteksi dan karakterisasi akan dipetakan secara spasial untuk menunjukkan distribusi GPL dan secara temporal untuk melihat tren kejadian dari waktu ke waktu di Selat Karimata.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Gelombang Panas Laut

Karakteristik rata-rata GPL berdasarkan matriks durasi, frekuensi, dan intensitas maksimum di perairan Selat Karimata selama periode 1992-2024 disajikan pada Gambar 2. Hasil analisis menunjukkan karakteristik GPL yang relatif aktif, yang ditandai oleh frekuensi kejadian tahunan yang lebih tinggi dibandingkan rata-rata global serta durasi dan intensitas yang signifikan. Secara umum, studi global melaporkan rata-rata kejadian GPL sekitar 1–2 kejadian per tahun (Oliver *et al.* 2018), sedangkan wilayah dengan frekuensi, durasi, dan

intensitas yang lebih tinggi dikategorikan sebagai wilayah dengan aktivitas GPL yang meningkat (*enhanced MHW activity*) (Holbrook *et al.* 2020). Secara rata-rata, kejadian GPL tercatat 2-3 kejadian per tahun, dengan durasi rata-rata mencapai 10 hari dan intensitas maksimum sebesar  $1,34^{\circ}\text{C}$  di atas ambang batas klimatologis. Nilai-nilai ini menegaskan bahwa Selat Karimata merupakan wilayah yang rentan terhadap anomali suhu laut ekstrem, sejalan dengan temuan Saragih *et al.* (2025) di Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPPNRI) 711 yang melaporkan frekuensi GPL berkisar antara 2-3 kejadian per tahun.

Rata-rata distribusi spasial durasi kejadian GPL selama 33 tahun (1992-2024) berkisar 10-13 hari (Gambar 2a) dengan intensitas lebih banyak terjadi di daerah laut lepas. Kejadian GPL di Selat Karimata cenderung berlangsung lebih dari seminggu hingga 2 minggu yang menunjukkan bahwa perairan ini cukup rentan terhadap periode pemanasan laut berkepanjangan. Kejadian dengan durasi terpanjang berada pada tanggal 27 April 2016 hingga 23 Oktober 2016 dengan total durasi 180 hari pada lokasi dengan koordinat  $110.425\text{ BT}, 3.675\text{ LS}$  dengan cakupan  $\pm 5,55\text{ km}$  sesuai dengan cakupan resolusi spasial. Durasi kejadian yang sangat panjang menunjukkan potensi tekanan termal yang persisten terhadap ekosistem laut tropis, yang diketahui dapat memperbesar dampak ekologis dan meningkatkan risiko gangguan biologis dibandingkan kejadian berdurasi pendek (Hobday *et al.*, 2016).

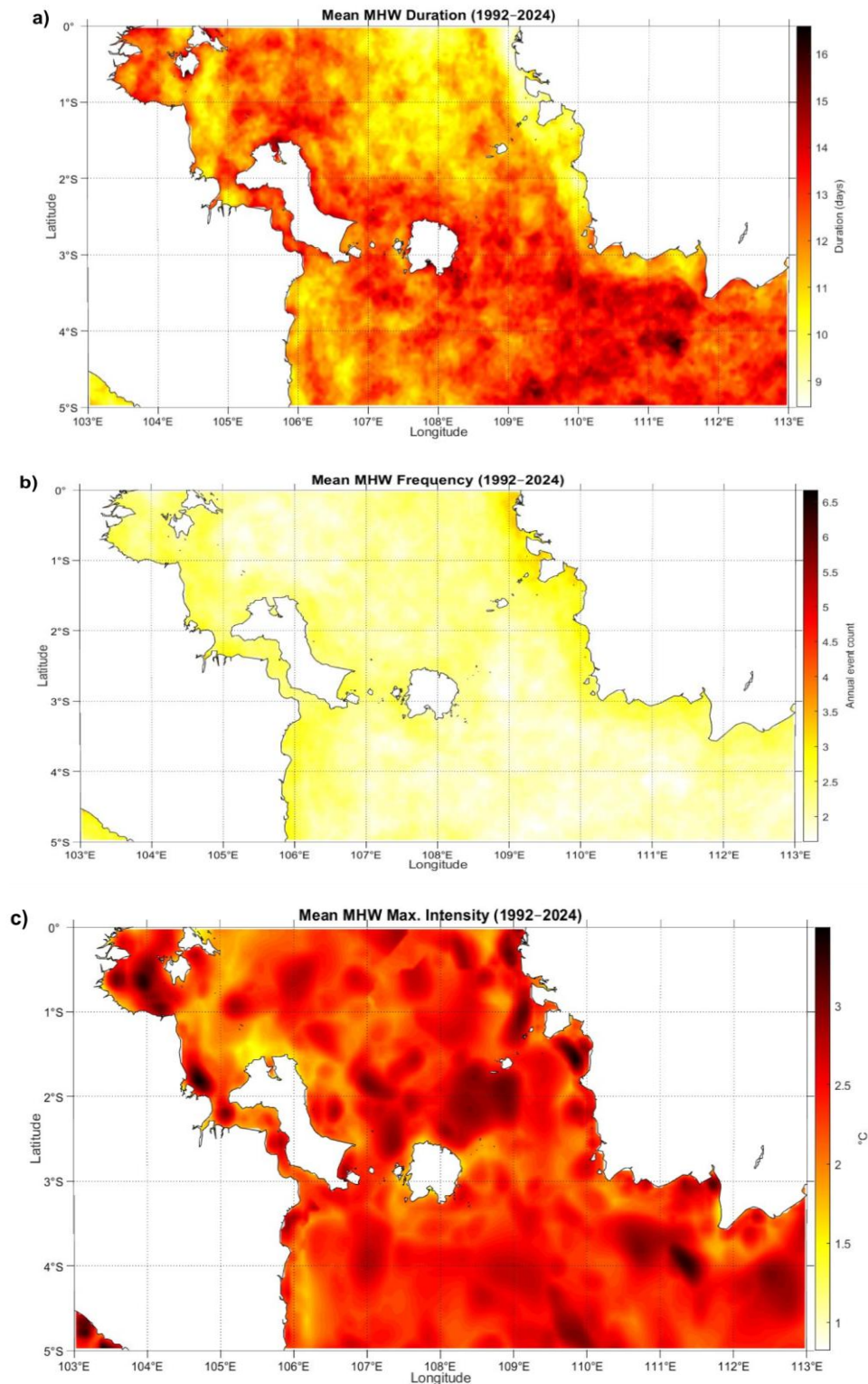
Rata-rata distribusi spasial frekuensi selama 33 tahun (1992-2024) berkisar antara 2-3 kali kejadian per tahun (Gambar 2b). Pola ini menunjukkan peristiwa GPL di Selat Karimata bersifat moderat dalam jumlah kejadian tahunan. Dapat dilihat bahwa lokasi yang paling sering mengalami frekuensi moderat ini menunjukkan pengaruh variabilitas iklim musiman seperti monsun dan ENSO, dimana tahun-tahun ENSO cenderung meningkatkan peluang munculnya GPL akibat anomali suhu permukaan laut yang lebih tinggi. Secara spasial, lokasi yang paling sering mengalami GPL terletak pada koordinat  $104.725\text{ BT}, 2.575\text{ LS}$ . Lokasi ini mengalami total 220 kejadian selama 33 tahun dengan rata-rata 6,67 kali kejadian per tahun yang dimana ini adalah nilai maksimum dari rata-rata frekuensi di perairan Selat Karimata. Sedangkan di lokasi ini GPL dengan frekuensi kejadian tertinggi pada tahun 2022 dengan total 11 kali kejadian dilanjut dengan tahun 1998 dan 2021 dengan total 10 kali kejadian. Studi global menunjukkan bahwa frekuensi dan durasi GPL telah meningkat secara signifikan selama beberapa dekade terakhir, yang memiliki konsistensi yang sama dengan pola kejadian tinggi di perairan Indonesia (Oliver *et al.*, 2018)

Rata-rata distribusi spasial intensitas maksimum GPL selama 33 tahun (1992-2024) berkisar antara  $2-3^{\circ}\text{C}$  di atas ambang batas klimatologis dengan area paling intens yang lebih tinggi teramati di wilayah pesisir (Gambar 2c). Pola ini menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih tinggi pada perairan pesisir dangkal dan semi-tertutup terhadap kejadian suhu ekstrem (Riztiawan *et al.*, 2025). Secara spasial, lokasi yang mengalami kejadian dengan nilai intensitas tertinggi terletak pada koordinat  $103.425\text{ BT}, 4.975\text{ LS}$  yang dimana mencapai nilai  $+3,49^{\circ}\text{C}$  di atas nilai ambang batas dengan durasi selama 8 hari pada 22 September 2010 hingga 29 September 2010. Peningkatan ini berpotensi besar menimbulkan tekanan termal pada ekosistem laut, seperti terumbu karang dan padang lamun, mengubah struktur komunitas ekosistem, serta mendorong pergeseran distribusi spesies yang berdampak pada fungsi dan produktivitas ekosistem (Gomes *et al.*, 2024) atau dengan kata lain mengganggu pola migrasi ikan pelagis yang merupakan komoditas utama pada perairan Selat Karimata.

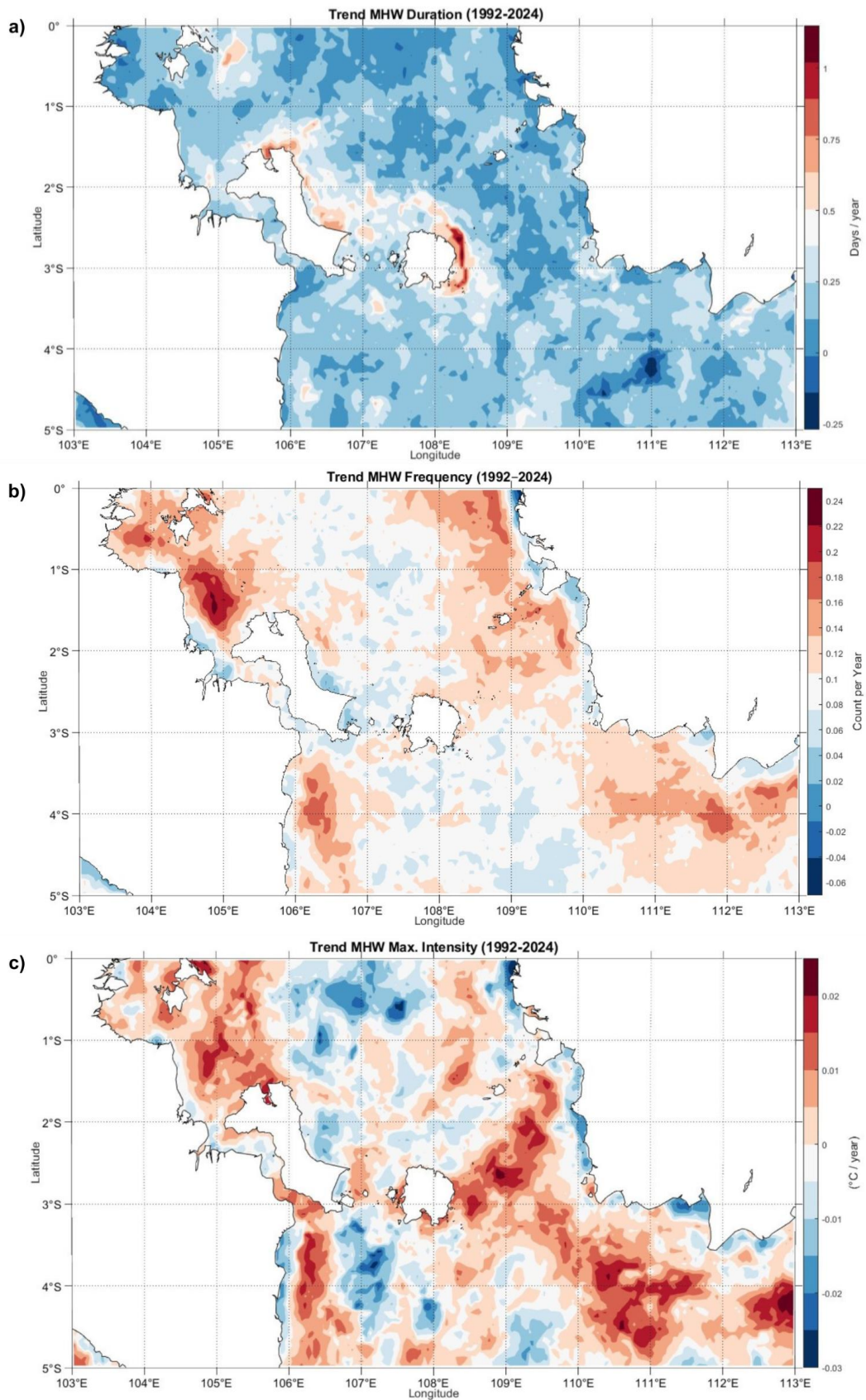
Analisa tren dilakukan menggunakan pendekatan regresi linear untuk mengkuantifikasi perubahan jangka panjang pada 3 metrik utama, yaitu durasi (Gambar 3a), frekuensi (Gambar 3b), dan intensitas maksimum (Gambar 3c). Nilai *slope* regresi merepresentasikan laju perubahan tahunan dari masing-masing indikator, di mana nilai positif menunjukkan peningkatan karakteristik GPL, sedangkan nilai negatif menunjukkan penurunan. Analisis ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai eskalasi atau pelemahan GPL secara spasial di wilayah kajian. Analisis tren GPL di perairan Selat Karimata selama periode 1992-2024 dilakukan menggunakan regresi linear untuk mengkuantifikasi perubahan jangka panjang pada durasi kejadian, frekuensi kejadian, dan intensitas maksimum. Nilai *slope* regresi merepresentasikan laju perubahan tahunan pada masing-masing parameter, dengan nilai positif menunjukkan peningkatan karakteristik GPL dan nilai negatif menunjukkan penurunan. Distribusi spasial tren ditampilkan pada Gambar 3 yang masing-masing menggambarkan durasi (Gambar 3a), frekuensi (Gambar 3b), dan intensitas maksimum (Gambar 3c).

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3a, tren durasi GPL memperlihatkan variasi spasial yang lebar dengan rentang nilai antara  $-0.26$  hingga  $1.15$  hari per tahun. Rata-rata spasial durasi tercatat sebesar  $0.21 \pm 0.12$  hari per tahun. Namun demikian, nilai rata-rata yang relatif rendah menyebabkan pola spasial pada peta didominasi oleh warna biru muda, mencerminkan area dengan tren positif lemah hingga mendekati nol.

Peningkatan durasi tertinggi teramati pada grid koordinat 108.38° BT dan 2.83° LS, dengan nilai mencapai 1.15 hari per tahun yang setara dengan 11.5 hari per dekade.



**Gambar 2.** Karakteristik GPL selama 33 tahun (1992-2024) di perairan Selat Karimata: a) Durasi Rata-rata; b) Frekuensi Rata-rata; dan c) Intensitas Maksimum Rata-rata



**Gambar 3.** Tren 33 tahun selama periode 1992-2024 GPL di perairan Selat Karimata: a) Durasi; b) Frekuensi; dan c) Intensitas Maksimum.

Distribusi spasial tren frekuensi GPL pada Gambar 3b menunjukkan rentang nilai antara -0.06 hingga 0.24 kejadian per tahun, dengan rata-rata spasial sebesar  $0.10 \pm 0.03$  kejadian per tahun. Nilai ini setara dengan peningkatan sekitar 1 kejadian per dekade yang mengindikasikan bahwa kejadian GPL di wilayah kajian cenderung semakin sering terjadi dari waktu ke waktu. Peningkatan frekuensi maksimum teridentifikasi pada grid koordinat  $104.88^\circ$  BT dan  $1.42^\circ$  LS, dengan nilai 0.24 kejadian per tahun atau 2.4 kejadian per dekade.

Tren intensitas maksimum GPL yang disajikan pada Gambar 3c menunjukkan rentang nilai antara -0.02 hingga  $0.02^\circ\text{C}$  per tahun, dengan rata-rata spasial sebesar  $0.0010 \pm 0.0081^\circ\text{C}$  per tahun. Peningkatan intensitas maksimum tertinggi tercatat pada grid koordinat  $112.97^\circ$  BT dan  $4.07^\circ$  LS, dengan nilai  $0.02^\circ\text{C}$  per tahun atau  $0.24^\circ\text{C}$  per dekade.

Sejalan dengan hasil analisis pada penelitian ini, Saragih *et al.* (2025) melaporkan bahwa tren frekuensi GPL di kawasan WPPNRI 711 menunjukkan nilai positif dengan kisaran 0-0.2 kejadian per tahun, terutama di wilayah pesisir Kalimantan dan pulau-pulau kecil di sekitar Sumatera. Pola tersebut konsisten dengan temuan pada perairan Selat Karimata yang memperlihatkan dominasi tren peningkatan frekuensi GPL secara spasial. Sebaliknya, tren intensitas maksimum GPL di WPPNRI 711 dilaporkan berada pada kisaran -0.08 hingga  $0.08^\circ\text{C}$  per tahun.

### Analisis Temporal

Parameter dari karakteristik spasial GPL dirata-ratakan setiap tahun selama periode 1992-2024 untuk memahami karakteristik dan variabilitas temporal setiap tahun kejadian GPL di perairan Selat Karimata. Hasilnya menunjukkan variabilitas secara temporal untuk wilayah Selat Karimata. Gambar 4 menampilkan karakteristik tahunan GPL di perairan Selat Karimata selama periode 1992-2024 dengan 3 parameter utama, yaitu durasi kejadian, frekuensi kejadian, dan intensitas maksimum.

Analisis ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pola temporal GPL yang berdampak pada dinamika ekosistem laut tropis. Karakteristik temporal untuk frekuensi (Gambar 4a) menunjukkan sebagian besar tahun dalam rentang observasi mencatat 1-3 kejadian GPL. Hal ini mencerminkan kondisi perairan yang relatif stabil pada sebagian besar periode. Namun, peningkatan nilai signifikan terlihat pada tahun 1998, 2010, dan terutama 2016.

Variabilitas antar-tahun menunjukkan bahwa kejadian GPL ekstrem tidak terdistribusi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada tahun-tahun tertentu. Intensitas tertinggi tercatat pada tahun 1998 ( $2.08^\circ\text{C}$ ) dan 2016 ( $1.93^\circ\text{C}$ ), sementara durasi terpanjang terjadi pada tahun 2016 dengan rata-rata 25 hari, diikuti oleh tahun 2023 (23.6 hari) dan 2015 (19.9 hari). Dari sisi frekuensi, lonjakan kejadian paling menonjol teramati pada tahun 2024 (8 kejadian), 1998 (7.7 kejadian), dan 2010 (7 kejadian).

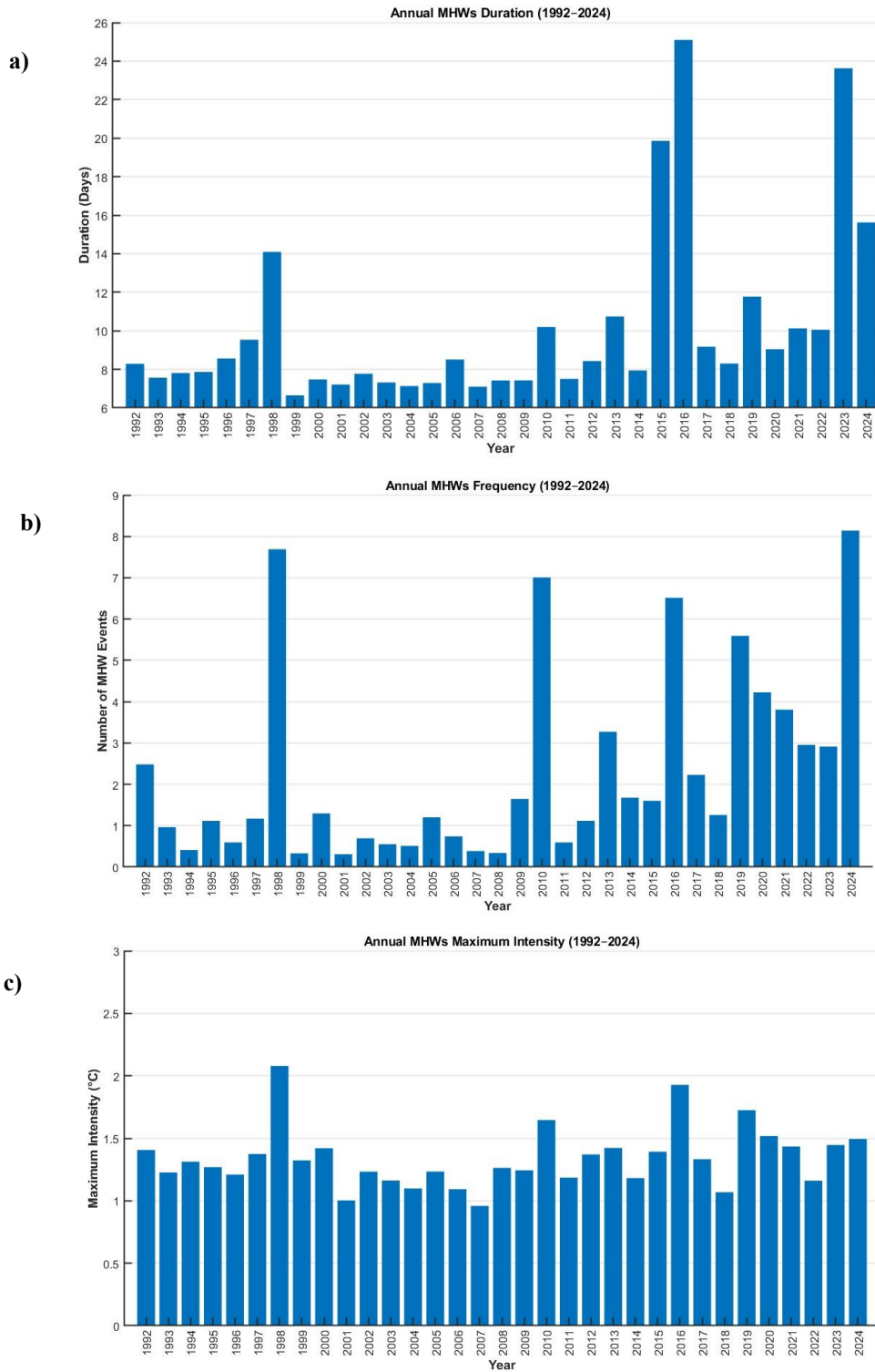
Pola ini menunjukkan keterkaitan yang kuat dengan variabilitas iklim skala besar, khususnya *El Niño Southern Oscillation* (ENSO). Berbeda dengan beberapa wilayah di Pasifik Barat yang cenderung mengalami GPL berdurasi panjang selama fase La Niña akibat akumulasi massa air hangat (*warm pool*), hasil analisis ini menunjukkan bahwa di Selat Karimata fase El Niño justru berperan dominan dalam memicu kejadian GPL dengan intensitas dan durasi tinggi, sebagaimana terlihat pada periode El Niño kuat tahun 1998 dan 2015-2016.

Mengacu pada mekanisme yang dijelaskan oleh Beliyana *et al.* (2023), dinamika GPL di perairan Indonesia Bagian Barat, termasuk Selat Karimata, lebih didominasi oleh *atmospheric forcing* dibandingkan adveksi laut dalam. Pada tahun-tahun El Niño kuat, penurunan curah hujan dan berkurangnya tutupan awan menyebabkan peningkatan radiasi matahari (*shortwave radiation*) yang signifikan. Kondisi ini berdampak langsung pada perairan dangkal di Selat Karimata yang memiliki kapasitas panas relatif kecil sehingga merespons pemanasan atmosfer secara cepat. Akibatnya, GPL yang terbentuk tidak hanya memiliki intensitas tinggi, tetapi juga bersifat persisten, dengan durasi yang dapat melampaui 25 hari seperti yang teramati pada tahun 2016.

Sebaliknya, selama fase La Niña (seperti tahun 2010 dan periode 2020-2022), meskipun frekuensi kejadian GPL dapat meningkat, rata-rata durasi dan intensitasnya cenderung lebih rendah dibandingkan tahun-tahun El Niño. Hal ini diduga berkaitan dengan meningkatnya tutupan awan dan curah hujan yang berperan mengurangi fluks radiasi matahari ke permukaan laut, sehingga membatasi akumulasi panas di lapisan permukaan, meskipun suplai massa air hangat dari Pasifik tetap berlangsung.

Selain pengaruh ENSO, peningkatan tren durasi GPL sebesar 11.5 hari per dekade juga tidak dapat dilepaskan dari dinamika oseanografi regional. Nie *et al.* (2023) melaporkan adanya tren peningkatan

transportasi panas melalui Arus Lintas Karimata yang mengalir dari Laut Cina Selatan menuju Laut Jawa. Peningkatan aliran air hangat ini berkontribusi terhadap terjadinya *background warming* di Selat Karimata, sehingga ambang batas suhu ekstrem lebih mudah terlampaui dan dipertahankan dalam jangka waktu yang lebih lama.



**Gambar 4.** (a) Durasi, (b) frekuensi, dan (c) intensitas maksimum seluruh kejadian GPL yang dirata-ratakan secara tahunan di perairan Selat Karimata

Temuan ini diperkuat oleh analisis Yuliardi *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa stabilitas kolom air di Selat Karimata sangat dipengaruhi oleh dinamika monsun. Pada periode peralihan monsun atau saat El Niño, ketika kecepatan angin melemah, proses pencampuran vertikal (*vertical mixing*) cenderung berkurang. Kondisi ini menyebabkan panas terperangkap di lapisan permukaan, memperpanjang durasi GPL. Mekanisme tersebut memberikan penjelasan yang konsisten terhadap kejadian GPL berdurasi sangat panjang pada tahun 2016 dan 2023 yang masing-masing bertahan lebih dari 20 hari.

## KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa Selat Karimata merupakan salah satu kawasan yang rentan terhadap kejadian suhu laut ekstrem di Indonesia bagian barat. Selat Karimata secara konsisten mengalami kejadian GPL dengan frekuensi moderat hingga tinggi, yaitu rata-rata 2-3 kejadian per tahun, durasi kejadian yang relatif panjang (sekitar 10-13 hari), serta intensitas maksimum yang mencapai lebih dari 1.3°C di atas ambang klimatologis. Distribusi spasial menunjukkan bahwa kejadian GPL berdurasi panjang dan berintensitas tinggi cenderung terkonsentrasi di wilayah pesisir dan perairan dangkal, yang memiliki kapasitas panas rendah dan respons cepat terhadap pemanasan atmosfer. Analisis tren jangka panjang mengindikasikan adanya peningkatan durasi dan frekuensi GPL secara signifikan, dengan laju peningkatan durasi mencapai 11.5 hari per dekade dan frekuensi sekitar satu kejadian per dekade, sementara intensitas maksimum menunjukkan tren positif yang lebih lemah namun tetap konsisten. Variabilitas temporal GPL memperlihatkan keterkaitan kuat dengan dinamika iklim skala besar, khususnya ENSO, di mana fase El Niño berperan dominan dalam memicu kejadian GPL dengan intensitas dan durasi tinggi akibat peningkatan radiasi matahari dan melemahnya pencampuran vertikal. Selain itu, penguatan transportasi panas melalui Arus Lintas Karimata turut berkontribusi terhadap *background warming* yang mempermudah terlampauinya ambang suhu ekstrem. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa GPL di Selat Karimata tidak hanya merupakan fenomena episodik, tetapi bagian dari tren pemanasan laut jangka panjang yang berpotensi memberikan tekanan termal berkelanjutan terhadap ekosistem pesisir, mengganggu dinamika perikanan tangkap, dan meningkatkan kerentanan sosial-ekologis wilayah WPPNRI 711, sehingga diperlukan strategi adaptasi dan pengelolaan laut yang lebih responsif terhadap perubahan iklim.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Sriwijaya atas pendanaan penelitian ini melalui Skema Penelitian Dosen Pemula tahun anggaran 2025 dengan Nomor Kontrak: 0107.171/UN9/SB3.LPPM.PT/2025.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni, N. R. K., Attaqwa, R., Simangunsong, F. G. A., Gunady, S. M., Maslukah, L., & Wirasatriya, A. 2025. Analisis Spasial dan Temporal Marine Heatwave di Selat Sunda (1982-2021). *Buletin Oseanografi Marina*, 14(3): 347-361. <https://doi.org/10.14710/buloma.v14i3.68953>
- Beliyana, E., Ningsih, N. S., Gunawan, S. R., & Tarya, A. 2023. Characteristics of Marine Heatwaves in the Indonesian Waters during the PDO, ENSO, and IOD Phases and Their Relationships to Net Surface Heat Flux. *Atmosphere*, 14(6): 1035. <https://doi.org/10.3390/atmos14061035>
- Carvalho, K. S., Smith, T. E., & Wang, S. 2021. Bering Sea Marine Heatwaves: Patterns, Trends and Connections with the Arctic. *Journal of Hydrology*, 600: 126462. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126462>
- Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Mann, M. E., ... & Reagan, J. 2022. Another Record: Ocean Warming Continues Through 2021 Despite La Niña Conditions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(3): 373-385. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1461-3>
- 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 of Environment*, 116: 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
- Eakin, C. M., Sweatman, H. P., & Brainard, R. E. 2019. The 2014–2017 Global-Scale Coral Bleaching Event: Insights and Impacts. *Coral Reefs*, 38(4): 539-545. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01844-2>

- Fezzi, C., Ford, D. J., & Oleson, K. L. 2023. The Economic Value of Coral Reefs: Climate Change Impacts and Spatial Targeting of Restoration Measures. *Ecological Economics*, 203: 107628. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107628>
- Frölicher, T. L., Fischer, E. M., & Gruber, N. 2018. Marine Heatwaves Under Global Warming. *Nature*, 560(7718): 360-364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., ... & Cerrano, C. 2009. Mass Mortality in Northwestern Mediterranean Rocky Benthic Communities: Effects of the 2003 Heat Wave. *Global Change Biology*, 15(5): 1090-1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>
- Gomes, D. G., Ruzicka, J. J., Crozier, L. G., Huff, D. D., Brodeur, R. D., & Stewart, J. D. 2024. Marine Heatwaves Disrupt Ecosystem Structure and Function Via Altered Food Webs and Energy Flux. *Nature Communications*, 15(1): 1988. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46263-2>
- Habibullah, A. D., Tarya, A., Ningsih, N. S., & Putri, M. R. 2023. Marine Heatwaves in the Indonesian Fisheries Management Areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1): 161. <https://doi.org/10.3390/jmse11010161>
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Gupta, A. Sen, & Wernberg, T. 2016. A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141: 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Holbrook, N. J., Gupta, A. Sen, Oliver, E. C. J., Hobday, A. J., Benthuisen, J. A., Scannell, H. A., Smale, D. A., & Wernberg, T. 2020. Keeping Pace with Marine Heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(9): 482-493. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0068-4>
- Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., ... & Wilson, S. K. 2018. Spatial and Temporal Patterns of Mass Bleaching of Corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371): 80-83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Iskandar, M. R., Ismail, M. F. A., Arifin, T., & Chandra, H. 2021. Marine Heatwaves of Sea Surface Temperature off South Java. *Heliyon*, 7(12): e08618. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08618>
- Li, Z., England, M. H., & Groeskamp, S. 2023. Recent Acceleration in Global Ocean Heat Accumulation by Mode and Intermediate Waters. *Nature Communications*, 14(1): 6888. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42468-z>
- Marbà, N., & Duarte, C. M. 2010. Mediterranean Warming Triggers Seagrass (*Posidonia oceanica*) Shoot Mortality. *Global Change Biology*, 16(8): 2366-2375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>
- Matthews, H. D., & Caldeira, K. 2008. Stabilizing Climate Requires Near-Zero Emissions. *Geophysical Research Letters*, 35(4). <https://doi.org/10.1029/2007GL032388>
- Mawren, D., Hermes, J., & Reason, C. J. C. 2022. Marine Heatwaves in the Mozambique Channel. *Climate Dynamics*, 58(1-2): 305-327. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05909-3>
- Miyama, T., Minobe, S., & Goto, H. 2021. Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010-2016. *Frontiers in Marine Science*, 7: 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576240>
- Nabilah, F., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. 2017. Analisis Pengaruh Fenomena El Nino dan La Nina Terhadap Curah Hujan Tahun 1998-2016 Menggunakan Indikator ONI (Oceanic Nino Index) (Studi Kasus: Provinsi Jawa Barat). *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4): 402-412.
- Ningsih, N. S., Belyana, E., Kamila, I. H., & Tarya, A. 2025. Long-Term Characteristics of Marine Heatwaves (1982-2021) in Indonesian Water and Their Impact on Upwelling (Case Study: Southern Java). *Frontiers in Marine Science*, 12: 1504995. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1504995>
- Oktaviani, D., Handoyo, G., Helmi, M., Kunarso, K., & Wirasatriya, A. 2021. Karakteristik Upwelling pada Periode Indian Ocean Dipole (IOD) Positif di Perairan Selatan Jawa Barat. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(4): 354-361.
- Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W., & Gupta, A. Sen. 2021. Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13(1): 313-342. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>
- Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuisen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H.

- A., Straub, S. C., & Wernberg, T. 2018. Longer and More Frequent Marine Heatwaves Over the Past Century. *Nature Communications*, 9(1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. 2013. On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13): 4500-4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Pujol, C., Pérez-Santos, I., Barth, A., & Alvera-Azcárate, A. 2022. Marine Heatwaves Offshore Central and South Chile: Understanding Forcing Mechanisms During the Years 2016-2017. *Frontiers in Marine Science*, 9: 800325. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.800325>
- Rachman, H. A., Gaol, J. L., & Syamsudin, F. 2019. Variasi Data Suhu Permukaan Laut, Tinggi Paras Laut, Klorofil-a, dan Upwelling di Perairan Selatan Jawa serta Korelasinya Dengan Data Lapangan. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(2): 289.
- Riztiawan, A. A., Firdaus, H., Saptari, M. K., Djamil, Y. S., Syamsuddin, M. L., Syamsudin, F., & Sari, Q. W. 2025. Karakteristik Gelombang Panas Laut di Perairan Selatan Jawa Barat. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 18(3): 218-226.
- Saragih, L. A., Ismunarti, D. H., Kunarso, K., & Hatmaja, R. B. 2025. Analisis Karakteristik Marine Heatwaves di Wilayah Pengelolaan Perikanan 711. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(2): 181-189.
- Schaeffer, A., & Roughan, M. 2017. Subsurface Intensification of Marine Heatwaves off Southeastern Australia: The Role of Stratification and Local Winds. *Geophysical Research Letters*, 44(10): 5025-5033. <https://doi.org/10.1002/2017GL073714>
- Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C. J., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., ... & Moore, P. J. 2019. Marine Heatwaves Threaten Global Biodiversity and the Provision of Ecosystem Services. *Nature Climate Change*, 9(4): 306-312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
- Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. 2009. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6): 1704-1709. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106>
- Ummenhofer, C. C., & Meehl, G. A. 2017. Extreme Weather and Climate Events with Ecological Relevance: A Review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723): 20160135. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- Wang, Y., Xu, T., Li, S., Susanto, R. D., Agustiadi, T., Trenggono, M., ... & Wei, Z. 2019. Seasonal Variation of Water Transport Through the Karimata Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(4): 47-57. <https://doi.org/10.1007/s13131-018-1224-2>
- Wijffels, S., Roemmich, D., Monselesan, D., Church, J., & Gilson, J. 2016. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change*, 6(2): 116-118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>
- WMO. 2017. *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. WMO-No. 1203.
- Wulansari, W., Widada, S., Maslukah, L., Wirasatriya, A., & Sari, T. 2026. Coastal Marine Heatwaves Detection in Java Using Satellite and In-situ. *Buletin Oseanografi Marina*, 15(1): 45-55. <https://doi.org/10.14710/buloma.v15i1.78458>
- Yuliardi, A. Y., Firdaus, R., Heltria, S., Prayogo, L. M., Nugroho, A. T., Rahmalia, D. A., & Sari, R. J. 2025. Distribution of Sea Surface Temperature and Salinity in the Karimata Strait. *Journal of Coastal and Ocean Sciences*, 6(1): 10-15. <https://doi.org/10.31258/jocos.6.1.10-15>
- Zhao, Z., & Marin, M. 2019. A MATLAB Toolbox to Detect and Analyze Marine Heatwaves. *Journal of Open Source Software*, 4(33): 1124. <https://doi.org/10.21105/joss.01124>