

Marine Heatwaves pada Lapisan Bawah Permukaan di Perairan Selatan Jawa: Tren, Frekuensi, Durasi, dan Intensitas Kumulatif Berdasarkan Data Model Asimilasi (1993-2019)

Subsurface Marine Heatwaves of South Java Sea: Trend, Frequency, Duration, and Cumulative Intensity Based on Assimilation Model (1993-2019)

Nabila Afifah Azuga^{1*}, Ivonne M. Radjawane¹

¹Prodi Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132

*email: officilnabilaafifahzg@gmail.com

Abstrak

Diterima
05 September 2022

Disetujui
22 September 2022

Marine heatwaves (MHWs) merupakan suatu kejadian pemanasan ekstrem di laut ketika suhu perairan berada di atas persentil ke-90 dari keadaan klimatologisnya selama setidaknya lima hari berturut-turut. Kejadian ini dapat meluas hingga ribuan kilometer dan telah terdeteksi hingga lapisan di bawah permukaan perairan (*subsurface*). MHWs digambarkan dengan metrik yang menjelaskan kejadian dengan lebih komprehensif, metrik tersebut antara lain (frekuensi, durasi, dan intensitas kumulatif tahunan). Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik kejadian MHWs pada lapisan *subsurface* selama 27 tahun (1993-2019). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data suhu perairan *Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis* pada kedalaman 0,4-763m dan indeks *Niño 3.4*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode statistik untuk menghitung rata-rata dan tren dari metrik MHWs. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kejadian MHWs pada kedalaman 0,4-92m disebabkan oleh kejadian ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) fase positif (*El Niño*) dengan keterlambatan 5-7 bulan dan pada kedalaman 109-763m diakibatkan oleh ENSO fase negatif (*La Niña*) dengan keterlambatan 1-3 bulan. Kejadian MHWs lebih tinggi frekuensinya pada kedalaman 418-763m dengan nilai maksimum yaitu 2,6 kejadian/tahun, durasi kejadian lebih besar pada kedalaman 0,4-77m dengan nilai maksimum durasi yaitu 30 hari/tahun, dan intensitas kumulatif maksimum kejadian selama 27 tahun yakni sebesar 90°C. Selama 27 tahun, tren frekuensi, durasi, dan intensitas kumulatif kejadian MHWs pada kedalaman 0,4-763m di perairan Selatan Jawa secara signifikan mengalami peningkatan.

Kata Kunci: *Marine Heatwaves, Subsurface, ENSO, Tren, Metrik.*

Abstract

Marine heatwaves (MHWs) are extreme warming events in the ocean when the temperature detected is above the 90th percentile of climatological temperature for at least five consecutive days. MHWs events can extend up to thousand kilometers and have been detected in the subsurface layer. MHWs are described by metrics (frequency, duration, and cumulative intensity). The purpose of this study was to determine the characteristics of MHWs in the subsurface layer for 27 years (1993-2019). The data used in this study is the sea water temperature data of the depth 0,4-763m from *Marine Copernicus Global Ocean Physics* and *Niño 3.4* indices. The method used in this study is a statistical method to calculate the average and trend of the MHWs metric. The results of this study denotes that the

occurrence of MHWs at a depth of 0.4-92m is caused by ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) positive phase (*El Niño*) with a delay of 5-7 months and at a depth of 109-763m caused by negative phase ENSO (*La Niña*) with a delay of 1-3 months. It was also found that the frequency of MHWs was higher at a depth of 418-763m with a maximum value is 2.6 events/year, the duration of MHWs was greater at a depth of 0,4-77 m, with a maximum value of duration is 30 days/year, and the maximum cumulative intensity of MHWs events for 27 years is 90°C. During the 1993-2019, the trend of frequency, duration, and cumulative intensity of MHWs in the South Java Sea has significantly increased.

Keyword: Marine Heatwaves, Subsurface, ENSO, Trend, Metric.

1. Pendahuluan

Marine heatwaves (MHWs) merupakan suatu kejadian pemanasan ekstrem di laut dalam jangka pendek ketika suhu perairan berada di atas persentil ke-90 dari keadaan klimatologisnya selama setidaknya lima hari berturut-turut (Hobday *et al.*, 2016). MHWs telah berdampak pada berbagai sistem di Bumi, mulai dari ekosistem di laut, proses fisis di laut hingga berdampak pada sosial ekonomi manusia (Collins *et al.*, 2019). Kejadian MHWs digambarkan dengan metrik yang menjelaskan beberapa karakteristik kejadian MHWs dengan lebih rinci. Adapun metrik yang digunakan yaitu intensitas kumulatif, intensitas maksimum, intensitas rata-rata, durasi, akumulasi durasi, dan frekuensi kejadian tahunan MHWs (Hobday *et al.*, 2016). Studi terbaru telah mengidentifikasi adanya lonjakan dalam peningkatan MHWs global selama beberapa dekade terakhir. Bersamaan dengan pemanasan global, MHWs terjadi dengan durasi yang lebih lama dan lebih intens (Oliver *et al.*, 2018).

Secara spasial, kejadian MHWs di lautan dapat meluas hingga ribuan kilometer dan telah terdeteksi pada daerah estuari, perairan tertutup, serta pada lapisan permukaan hingga lapisan di bawah permukaan perairan (*subsurface*) (Helmuth *et al.*, 2006). Sebagian besar kejadian MHWs di dunia berhubungan erat dengan fenomena ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), namun penyebab terjadinya MHWs dapat bervariasi dari satu kawasan dengan kawasan lainnya. Kejadian MHWs di Samudra Pasifik Barat Tropis pada lapisan *subsurface* tidak berkorelasi dengan kejadian MHWs di permukaan perairan dan ditemukan bahwa frekuensi kejadian tahunan MHWs di lapisan *subsurface* lebih tinggi serta intensitasnya lebih kuat dibandingkan pada bagian permukaan. Lebih spesifik, ditemukan bahwa kejadian MHWs di Samudra Pasifik Barat Tropis paling tinggi intensitasnya pada daerah termoklin di kedalaman 40-300m. Walaupun secara statistik ENSO tidak berkorelasi secara signifikan terhadap kejadian MHWs, ditemukan bahwa pada lapisan *subsurface* Samudra Pasifik Barat Tropis kejadian MHWs mengalami peningkatan frekuensi dan intensitas kejadiannya saat fase *La Niña* (Hu *et al.*, 2021).

Di Indonesia kejadian MHWs telah terdeteksi pada beberapa kawasan perairan, akan tetapi sangat dominan terlokalisasi di perairan selatan Jawa dengan intensitas rata-rata lebih dari 1,4 °C serta berkorelasi erat dengan peristiwa ENSO pada fase *El Niño* dan juga berkorelasi dengan peristiwa IOD (*Indian Ocean Dipole*) saat fase positif (Iskandar *et al.*, 2021). Menurut (Habibullah, 2022), selama 39 tahun (1982-2020), tren kejadian MHWs pada lapisan permukaan di perairan selatan Jawa secara signifikan mengalami peningkatan pada frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif kejadian MHWs khususnya pada tahun 1998 dan tahun 2016 dengan pengaruh paling besar diakibatkan oleh adanya fenomena ENSO saat fase *El Niño* dengan keterlambatan 6-8 bulan.

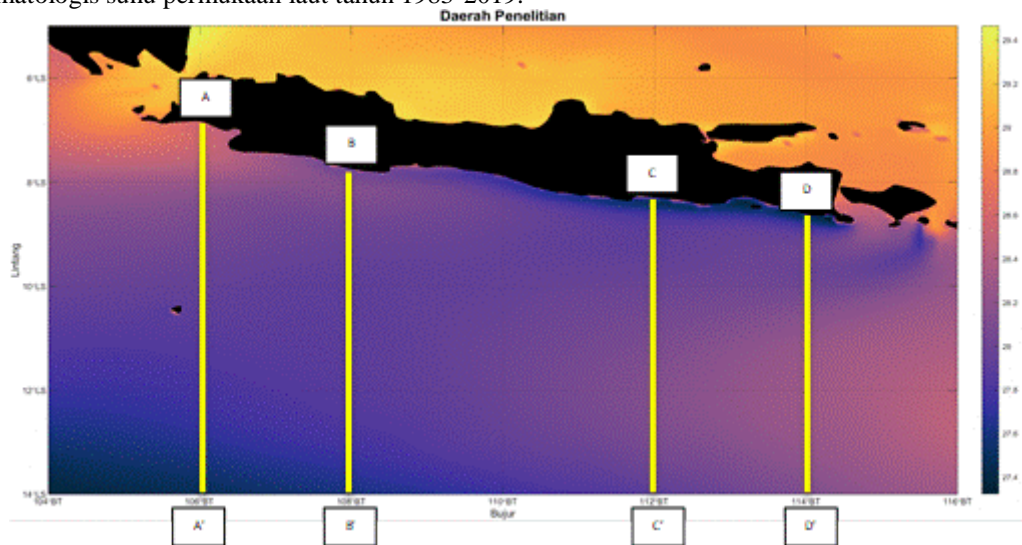
Kajian mengenai MHWs di perairan Indonesia sebagian besar hanya terfokus pada wilayah permukaan perairan dan belum membahas secara detail tentang karakteristik MHWs di lapisan *subsurface*. Tingginya keanekaragaman hayati di perairan Indonesia terutama di selatan Jawa dapat terganggu apabila terjadi MHWs. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui serta menganalisis karakteristik kejadian MHWs pada lapisan *subsurface* dengan menghitung tren dan rata-rata dari metrik kejadian MHWs (frekuensi tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif) selama 27 tahun (1993-2019).

2. Bahan dan Metode

2.1. Waktu dan Tempat

Daerah kajian pada penelitian ini mencakup wilayah perairan selatan Jawa yang terletak pada koordinat 5° LS-14° LS dan 104° BT-116° BT. Agar hasil pengolahan data lebih akurat, wilayah kajian dibagi menjadi 4 penampang meridional yang terletak pada (AA'= 7 °LS-14 °LS dan 106 °BT), (BB'= 7,5 °LS-14 °LS dan 108 °BT), (CC'= 8 °LS-14 °LS dan 112 °BT), dan (DD'= 8,3 °LS-14 °LS dan 114 °BT), dengan asumsi bahwa penampang AA' dan BB' mewakili bagian barat dari perairan selatan Jawa dan penampang CC' dan DD'

mewakili bagian timur perairan selatan Jawa. Peta daerah kajian terdapat pada Gambar 1 dengan informasi rata-rata klimatologis suhu permukaan laut tahun 1983-2019.



Gambar 1. Daerah Penelitian

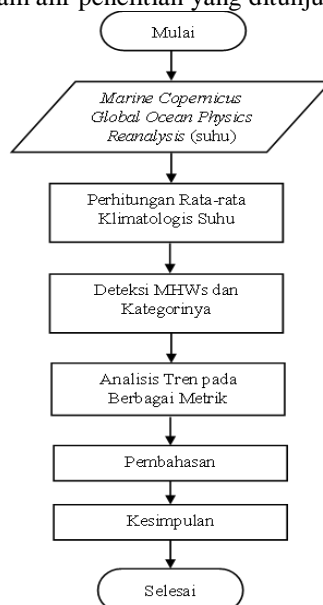
Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data suhu perairan pada kedalaman 0,4 m hingga kedalaman 763 m yang diperoleh dari data *Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis* dengan resolusi temporal harian dan resolusi spasial $0,083^\circ \times 0,083^\circ$. Pembagian lapisan kedalaman untuk data suhu perairan yang dianalisis ditunjukkan pada Tabel 1 baris pertama dengan durasi selama 27 tahun (1 Januari 1993-31 Desember 2019).

Tabel 1. Data yang Digunakan dalam Penelitian

Data	Sumber/Laman Penyedia Data
Suhu Perairan (0,4; 9; 15; 29; 40; 55; 65; 77; 92; 109; 130; 155; 186; 222; 266; 318; 380; 453; 541; 643; 763) m	https://resources.marine.copernicus.eu/product-download/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030
Indeks <i>Niño</i> 3.4	https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data

2.2. Metode Pengolahan Data

Dalam menyelesaikan masalah penelitian, ada beberapa tahapan yang dilakukan untuk melakukan pengolahan data, tahapan pertama adalah menghitung klimatologis suhu perairan, tahap kedua adalah melakukan deteksi kejadian MHWs pada setiap lapisan kedalaman perairan, dan tahapan terakhir yaitu menghitung rata-rata dan tren setiap metrik kejadian MHWs pada setiap lapisan kedalaman. Secara umum, tahapan tersebut ditampilkan pada diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.2.1. Perhitungan Rata-rata Nilai Klimatologis Suhu Perairan

Langkah awal yaitu melakukan perhitungan rata-rata klimatologis suhu perairan yang diperoleh dari data *Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis*. Rata-rata klimatologi dihitung mulai dari tahun 1993-2019 (27 tahun). Perhitungan klimatologi mengacu pada (Hobday *et al.*, 2016), dinyatakan pada persamaan berikut:

$$T_m(j) = \sum_{y=y_s}^{y_e} \sum_{d=j-5}^{j+5} \frac{T(y,d)}{11(y_e - y_s)}$$

keterangan:

T_m	= rata-rata klimatologis (°C)
j	= hari dalam setahun
y_s	= tahun mulai
y_e	= tahun akhir
T	= suhu perairan (°C)

2.2.2. Deteksi Kejadian MHWs

Setelah melakukan perhitungan rata-rata klimatologi suhu perairan selama 27 tahun, kemudian dilakukan deteksi kejadian MHWs dengan menghitung nilai suhu perairan yang berada di atas persentil ke-90 pada setiap lapisan kedalaman, dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_{90}(j) = P_{90}(X)$$

dengan P_{90} adalah persentil ke-90 dan $P_{90}(X)$, (X) dijelaskan sebagai:

$$X = \{T_{(y,d)} \mid y_s \leq y \leq y_e, j - 5 \leq d \leq j + 5\}$$

2.2.3. Perhitungan Rata-Rata dan Tren Metrik MHWs

Metrik yang digunakan dalam analisis tren kejadian MHWs adalah frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif tahunan pada setiap lapisan kedalaman (0,4 -763 m). Keterangan metrik MHWs yang dihitung ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Metrik MHWs (Hobday *et al.*, 2016)

Metrik MHWs	Keterangan	Satuan
Frekuensi kejadian tahunan	Jumlah kejadian MHWs dalam satu tahun	Kejadian/tahun
Durasi tahunan	Waktu awal mulai hingga selesai MHWs per jumlah kejadian dalam satu tahun	Hari
Intensitas kumulatif tahunan	Total penjumlahan dari intensitas sepanjang durasi kejadian MHWs dalam satu tahun	°C

Metrik MHWs tersebut lalu dirata-ratakan (durasi tahunan), kemudian diakumulasikan (intensitas kumulatif tahunan dan frekuensi kejadian tahunan) dalam satu tahun. Selanjutnya, dilakukan perhitungan tren untuk masing-masing metrik yang merujuk pada (Oliver *et al.*, 2018), dengan cara melihat perbedaan antara nilai rata-rata dua irisan waktu. Irisan waktu yang pertama dimulai dari 1993 hingga 2005 dan irisan waktu kedua dimulai dari 2007 hingga 2019. Tren dihitung dengan cara memperkurangkan nilai rata rata dari tahun 2007-2019 dengan nilai rata-rata tahun 1993-2005, atau seperti persamaan berikut:

$$Tren = (\overline{2007 \rightarrow 2019}) - (\overline{1993 \rightarrow 2005})$$

Apabila hasilnya positif maka kejadian MHWs (pada metrik yang dihitung) mengalami peningkatan, sebaliknya apabila hasilnya negatif maka kejadian MHWs mengalami penurunan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kejadian MHWs

Kejadian MHWs diidentifikasi sebagai periode ketika suhu laut melebihi nilai ambang batas di atas persentil ke-90 dari keadaan rata-rata nilai suhu klimatologisnya dan berlangsung setidaknya selama lima hari berturut-turut. Kejadian ini dapat bertahan selama sehari-hari hingga berbulan-bulan, dapat meluas hingga ribuan kilometer, dan dapat menembus beberapa ratus meter ke laut dalam (Hobday *et al.*, 2016). MHWs terjadi pada tempat dan waktu tertentu dengan nilai ambang batas yang beragam pada setiap lokasinya (Collins *et al.*, 2019). Berbagai metrik digunakan untuk menjelaskan kejadian MHWs dengan lebih detail dan komprehensif, dalam penelitian ini metrik yang digunakan antara lain yaitu frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif tahunan.

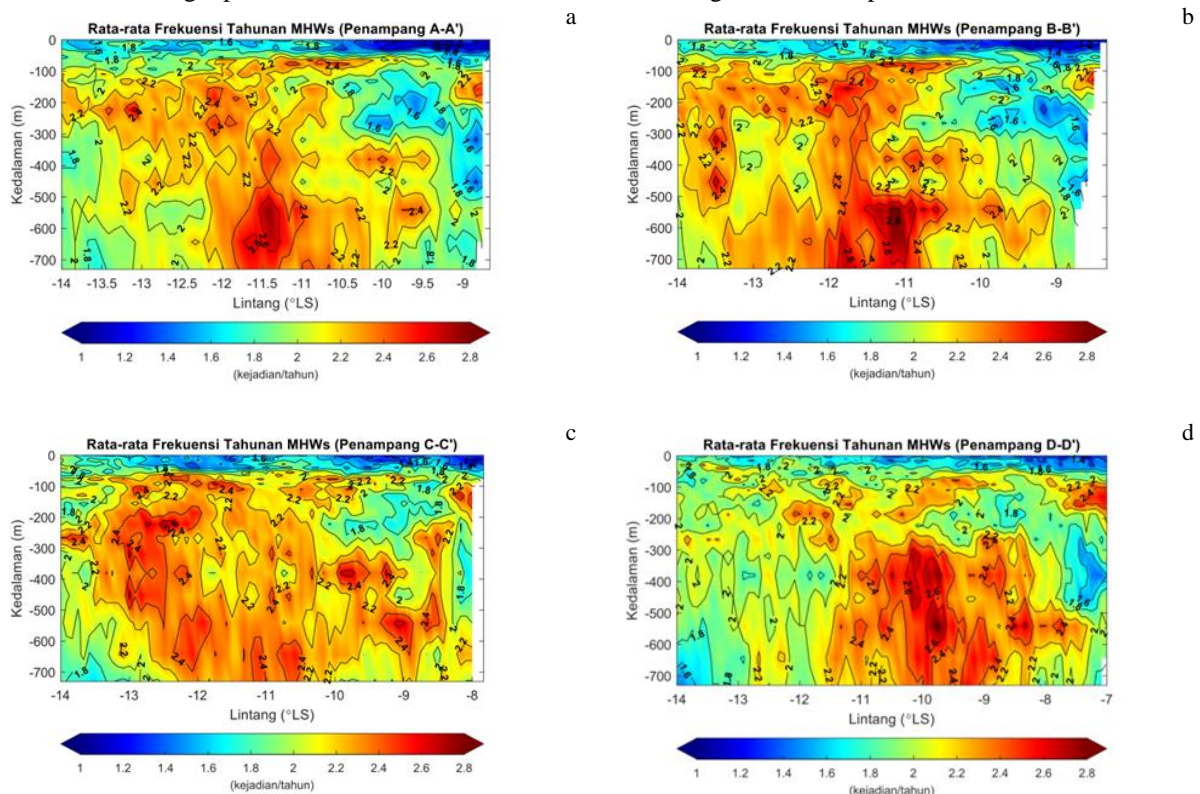
3.2. Frekuensi Kejadian Tahunan MHWs (1993-2019)

Karakteristik MHWs dapat dijelaskan dengan frekuensi, yaitu berapa banyak kejadian MHWs yang terjadi dalam satu tahun. Gambar 3a menunjukkan rata-rata frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang AA'. Rata-rata nilai minimum frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -9,5 s/d -10 °LS dan 106 °BT dan berada di kedalaman 0,4-40m yaitu sebanyak 1,2 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling sedikit terjadi sebanyak 37,8 kejadian di wilayah tersebut. Sedangkan nilai maksimum dari rata-rata frekuensi kejadian tahunan yaitu sebanyak 2,6 kejadian/tahun terletak pada koordinat -11,5 °LS dan 106 °BT dan berada di kedalaman 541-643m, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling banyak terjadi dengan total 70,2 kejadian pada wilayah tersebut.

Gambar 3b menunjukkan rata-rata frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang BB'. Rata-rata nilai minimum frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -8,5 s/d -9,8 °LS dan 108 °BT dan berada di kedalaman 0,4-29m dengan jumlah kejadian sebanyak 1,2 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling sedikit terjadi sebanyak 37,8 kejadian di wilayah tersebut. Sedangkan nilai maksimum dari rata-rata frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -11 °LS dan 108 °BT dan berada di kedalaman 541m dengan jumlah kejadian sebanyak 2,8 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling banyak terjadi dengan total 75,6 kejadian pada wilayah tersebut.

Gambar 3c menunjukkan rata-rata frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang CC'. Rata-rata nilai minimum frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -8 °LS dan 112 °BT dan berada di kedalaman 0,4-15m dengan jumlah kejadian sebanyak 1,2 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling sedikit terjadi sebanyak 37,8 kejadian di wilayah tersebut. Sedangkan nilai maksimum dari rata-rata frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -11 °LS dan 112 °BT dan berada di kedalaman 266m dengan jumlah kejadian sebanyak 2,6 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling banyak terjadi dengan total 70,2 kejadian pada wilayah tersebut.

Gambar 3d menunjukkan rata-rata frekuensi kejadian tahunan MHWs pada Penampang DD'. Rata-rata nilai minimum frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -8 °LS dan 114 °BT dan berada di kedalaman 0,4-15m dengan jumlah kejadian sebanyak 1,2 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling sedikit terjadi sebanyak 37,8 kejadian di wilayah tersebut. Sedangkan nilai maksimum dari rata-rata frekuensi kejadian tahunan terletak pada koordinat -9,8 s/d -10,4 °LS dan 114 °BT dan berada di kedalaman 318-643m dengan jumlah kejadian sebanyak 2,6 kejadian/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa selama 27 tahun kejadian MHWs paling banyak terjadi dengan total 70,2 kejadian pada wilayah tersebut diidentifikasi sebagai periode ketika suhu laut melebihi nilai ambang batas di atas persentil ke-90



Gambar 3. Rata-rata Frekuensi Kejadian Tahunan MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

Kejadian MHWs di perairan selatan Jawa telah terdeteksi mulai dari permukaan perairan hingga pada kedalaman 763m dengan rata-rata nilai frekuensi kejadian tahunan pada seluruh penampang (AA', BB', CC', dan DD') menunjukkan bahwa rata-rata nilai frekuensi paling rendah berada pada kedalaman 0,4-92m dengan rentang nilai sebanyak 1,2-2,4, sedangkan nilai frekuensi paling tinggi berada pada kedalaman 318-763m dengan rentang nilai sebanyak 2,6-2,8 kejadian/tahun. Selain frekuensi kejadian tahunan, MHWs juga dapat dijelaskan oleh durasi yaitu waktu yang diperlukan mulai dari terbentuknya MHWs hingga berakhirnya MHWs yang dihitung dalam satuan hari. Nilai minimum rata-rata durasi tahunan yaitu 14 hari/tahun yang terdapat di kedalaman 318-763m, sedangkan nilai maksimum rata-rata durasi tahunan berkisar antara 22-32 hari/tahun yang terdapat di kedalaman 0,4-92m.

3.3. Durasi Tahunan Kejadian MHWs (1993-2019)

Rata-rata durasi tahunan kejadian MHWs pada penampang AA' (Gambar 4a) menunjukkan bahwa rata-rata durasi tahunan paling rendah terdapat di kedalaman 763m dan terletak pada -11,5°LS dan 106 °BT dengan nilai 14 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi minimum selama 27 tahun yakni selama 378 hari di kawasan tersebut. Sedangkan rata-rata durasi tahunan paling tinggi terdapat di kedalaman 0,4-55m dan terletak pada -9 s/d -10°LS dan 106 °BT dengan nilai 30-32 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi maksimum selama 27 tahun yakni selama 810-864 hari pada kawasan tersebut.

Rata-rata durasi tahunan kejadian MHWs pada penampang BB' (Gambar 4b) menunjukkan bahwa rata-rata durasi tahunan paling rendah terdapat di kedalaman 109-763m dan terletak pada -11 s/d -12 °LS dan 108 °BT dengan nilai 14 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi minimum selama 27 tahun yakni selama 378 hari di kawasan tersebut. Sedangkan rata-rata durasi tahunan paling tinggi terdapat di kedalaman 0,4-55m dan terletak pada -9,5 °LS dan 106 °BT dengan nilai 30 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi maksimum selama 27 tahun yakni selama 810 hari pada kawasan tersebut.

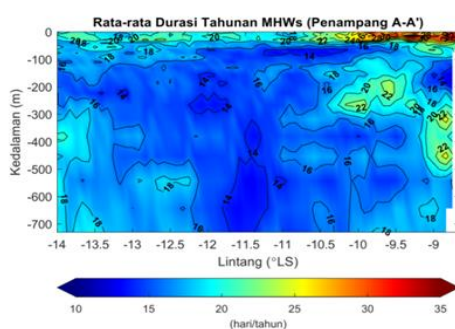
Rata-rata durasi tahunan kejadian MHWs pada penampang CC' (Gambar 4c) menunjukkan bahwa rata-rata durasi tahunan paling rendah terdapat di kedalaman 318-453m dan terletak pada -10,5 s/d -11 °LS dan 112 °BT dengan nilai 14 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi minimum selama 27 tahun yakni selama 378 hari di kawasan tersebut. Sedangkan rata-rata durasi tahunan paling tinggi terdapat di kedalaman 0,4-15m dan terletak pada -8 °LS dan 106 °BT dengan nilai 28 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi maksimum selama 27 tahun yakni selama 756 hari pada kawasan tersebut.

Rata-rata durasi tahunan kejadian MHWs pada Penampang DD'. (Gambar 4d) menunjukkan bahwa rata-rata durasi tahunan paling rendah terdapat di kedalaman 318-763m dan terletak pada -9 s/d -10 °LS dan 114 °BT dengan nilai 14 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa total nilai durasi minimum selama 27 tahun yakni selama 378 hari di kawasan tersebut. Sedangkan total rata-rata durasi tahunan paling tinggi terdapat di kedalaman 0,4-9m dan terletak pada -8 °LS dan 106 °BT dengan nilai 24 hari/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai durasi maksimum selama 27 tahun yakni selama 648 hari pada kawasan tersebut.

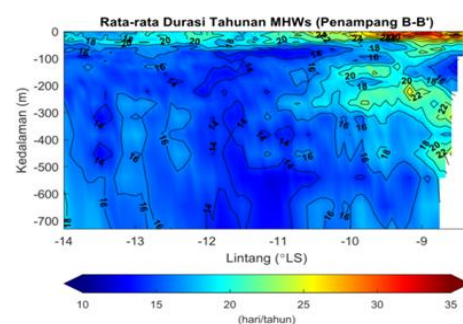
Tingginya nilai frekuensi kejadian tahunan MHWs akan berkorelasi negatif dengan nilai durasi tahunan kejadian MHWs, hal ini mengartikan bahwa ketika kejadian MHWs semakin sering terjadi maka nilai durasi akan berkurang dan berlaku sebaliknya (Oliver *et al.*, 2018). Nilai korelasi antara frekuensi kejadian tahunan dan durasi tahunan mendekati nilai -1, hal ini berarti adanya korelasi yang kuat antara frekuensi dan durasi dengan nilai negatif yang mengartikan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka nilai durasi akan semakin rendah dan sebaliknya. Nilai korelasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Korelasi Antara Frekuensi Kejadian Tahunan dan Durasi Tahunan

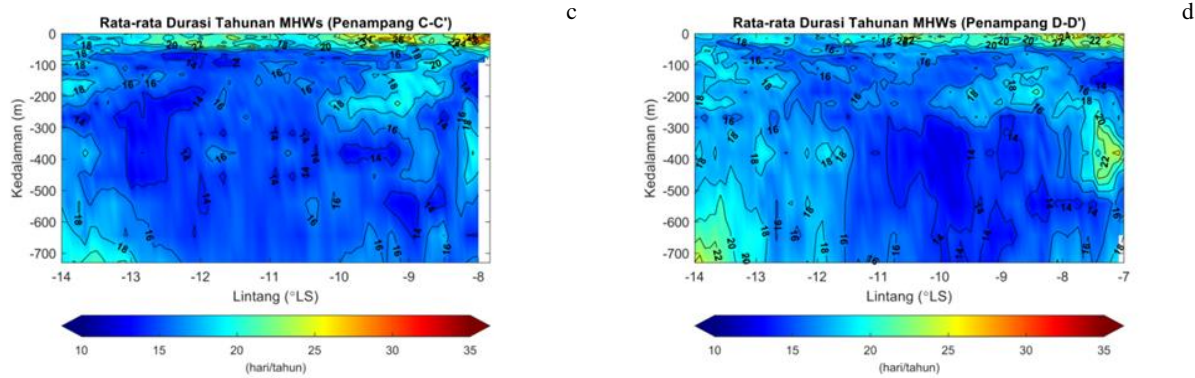
Nilai Korelasi Antara Frekuensi Kejadian Tahunan dan Durasi Tahunan	
Wilayah Kajian	Nilai Korelasi
Penampang AA'	-0,9404
Penampang BB'	-0,9358
Penampang CC'	-0,9531
Penampang DD'	-0,9510



a



b



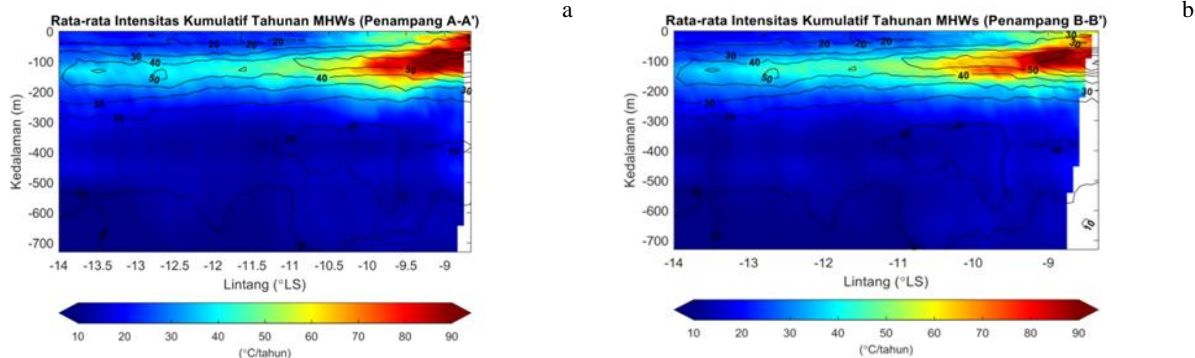
Gambar 4. Rata-rata Durasi Tahunan Kejadian MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

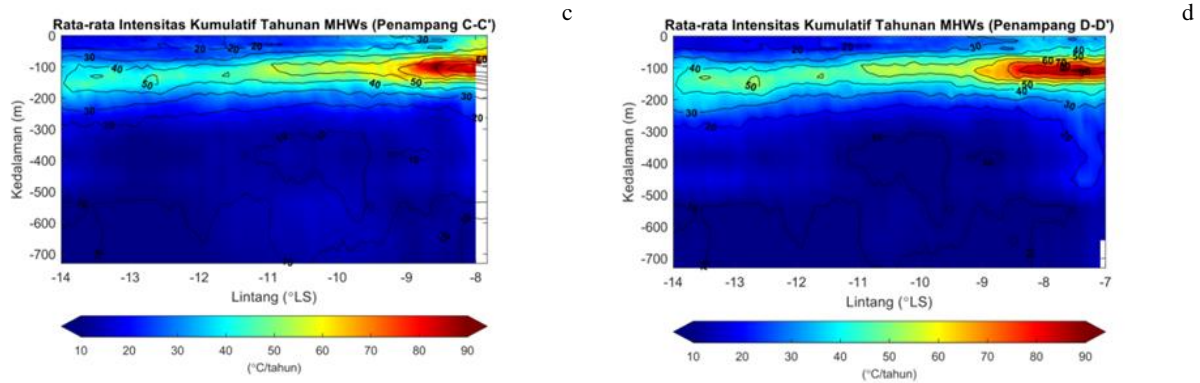
3.4. Intensitas Kumulatif Tahunan Kejadian MHWs (1993-2019)

Pada penampang AA' (Gambar 5a), nilai minimum rata-rata intensitas kumulatif tahunan kejadian MHWs yaitu 10 °C/tahun, terletak pada koordinat -9 s/d -14 °LS dan 106 °BT di kedalaman 318-763m. Sedangkan nilai maksimum yaitu 50 °C/tahun, terletak pada koordinat -9 s/d -10,3 °LS dan 106 °BT di kedalaman 109-130m. Hal ini mengindikasikan bahwa, total rata-rata nilai minimum dari intensitas kumulatif kejadian MHWs selama 27 tahun yaitu sebesar 270 °C pada wilayah tersebut, sedangkan total rata-rata nilai maksimum intensitas kumulatif selama 27 tahun yaitu sebesar 1350 °C.

Pada penampang BB' (Gambar 5b), nilai minimum rata-rata intensitas kumulatif tahunan kejadian MHWs yaitu 10 °C/tahun, terletak pada koordinat -9 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 318-763m. Sedangkan nilai maksimum yaitu 50 °C/tahun, terletak pada koordinat -8,6 s/d -9,8 °LS dan 108 °BT di kedalaman 109-130m. Hal ini mengindikasikan bahwa, total rata-rata nilai minimum dari intensitas kumulatif kejadian MHWs selama 27 tahun yaitu sebesar 270 °C pada wilayah tersebut, sedangkan total rata-rata nilai maksimum intensitas kumulatif selama 27 tahun yaitu sebesar 1350 °C. Pada penampang CC' (Gambar 5c), nilai minimum rata-rata intensitas kumulatif tahunan kejadian MHWs yaitu 10 °C/tahun, terletak pada koordinat -9 s/d -14 °LS dan 112 °BT di kedalaman 318-763m. Sedangkan nilai maksimum yaitu 60 °C/tahun, terletak pada koordinat -8,3 s/d -9 °LS dan 112 °BT di kedalaman 109-130m. Hal ini mengindikasikan bahwa, total rata-rata nilai minimum dari intensitas kumulatif kejadian MHWs selama 27 tahun yaitu sebesar 270 °C pada wilayah tersebut, sedangkan total rata-rata nilai maksimum intensitas kumulatif selama 27 tahun yaitu sebesar 1620 °C.

Pada Penampang DD'. (Gambar 5d), nilai minimum rata-rata intensitas kumulatif tahunan kejadian MHWs yaitu 10 °C/tahun, terletak pada koordinat -9 s/d -14 °LS dan 114 °BT di kedalaman 318-763m. Sedangkan nilai maksimum yaitu 90 °C/tahun, terletak pada koordinat -7 s/d -8,6 °LS dan 114 °BT di kedalaman 109-130m. Hal ini mengindikasikan bahwa, total rata-rata nilai minimum dari intensitas kumulatif kejadian MHWs selama 27 tahun yaitu sebesar 270 °C pada wilayah tersebut, sedangkan total rata-rata nilai maksimum intensitas kumulatif selama 27 tahun yaitu sebesar 2430 °C. Intensitas kejadian MHWs merupakan selisih dari nilai suhu yang diamati dengan nilai yang diprediksi berdasarkan rata-rata suhu klimatologis, mencakup intensitas maksimum maupun intensitas rata-rata saat berlangsungnya kejadian MHWs, dan intensitas kumulatif (total penjumlahan intensitas MHWs sepanjang durasi kejadian MHWs). Berdasarkan hasil yang telah diperoleh (Gambar 3), dapat diketahui bahwa nilai maksimum intensitas kumulatif tahunan berada di kedalaman 109-155m dengan lokasi berada di dekat pesisir (*nearshore*) perairan selatan Jawa berkisar antara 50-90 °C/tahun, sedangkan nilai minimum yaitu 10 °C/tahun berada di perairan yang lebih dalam dan jauh dari kawasan pesisir (*offshore*).





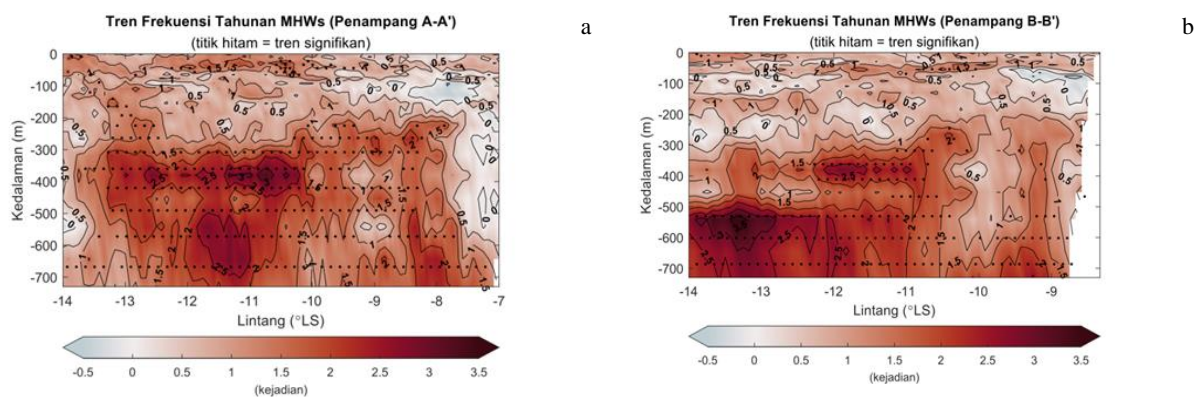
Gambar 5. Rata-rata Intensitas Kumulatif Kejadian Tahunan MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

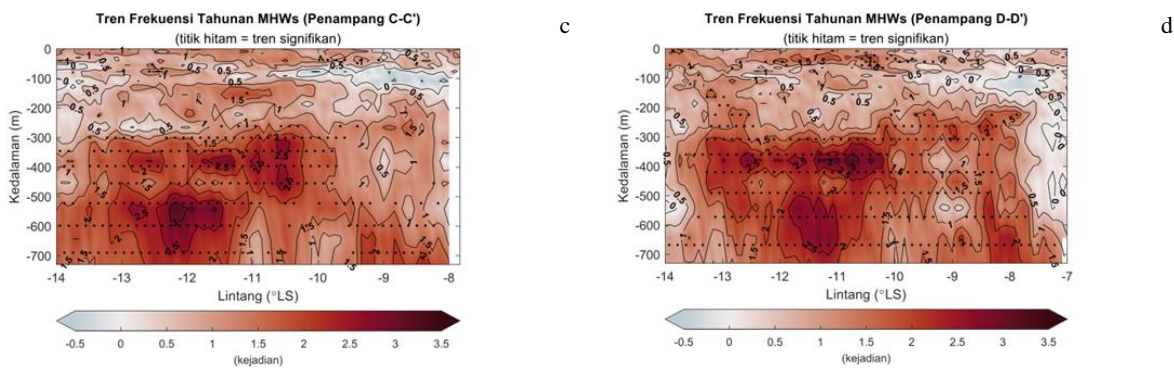
3.5. Tren Frekuensi Tahunan Kejadian MHWs (1993-2019)

Tren frekuensi tahunan kejadian MHWs selama 27 tahun pada seluruh penampang (AA', BB', CC', dan DD'), secara signifikan mengalami peningkatan pada kedalaman 318-763m dengan rentang nilai maksimum yaitu +3 s/d +3,5 kejadian. Gambar 6a menunjukkan tren frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang AA'. Berdasarkan gambar tersebut dapat dinyatakan bahwa frekuensi kejadian tahunan mengalami peningkatan, dengan nilai tren maksimum yaitu +3 kejadian, terletak pada koordinat -10 s/d -11 °LS dan 106 °BT di kedalaman 318-380m. Sedangkan nilai minimum tren frekuensi kejadian tahunan MHWs yaitu 0 kejadian terletak pada koordinat -7 °LS dan 106 °BT di kedalaman 109-543m.

Gambar 6b menunjukkan tren frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang BB'. Berdasarkan gambar tersebut dapat dinyatakan bahwa frekuensi kejadian tahunan mengalami peningkatan, dengan nilai tren maksimum yaitu +3,5 kejadian, terletak pada koordinat -13,5 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 541-643m. Sedangkan nilai minimum tren frekuensi kejadian tahunan MHWs yaitu 0 kejadian terletak pada koordinat -13 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 266m. Gambar 6c menunjukkan tren frekuensi kejadian tahunan MHWs pada penampang CC'. Berdasarkan gambar tersebut dapat dinyatakan bahwa frekuensi kejadian tahunan mengalami peningkatan, dengan nilai tren maksimum yaitu +3 kejadian, terletak pada koordinat -12,5 °LS dan 112 °BT di kedalaman 541m. Sedangkan nilai minimum tren frekuensi kejadian tahunan MHWs yaitu 0 kejadian terletak pada koordinat -8 s/d -10°LS dan 112 °BT di kedalaman 109-155m.

Gambar 6D menunjukkan tren frekuensi kejadian tahunan MHWs pada Penampang DD'. Berdasarkan gambar tersebut dapat dinyatakan bahwa frekuensi kejadian tahunan MHWs mengalami peningkatan, dengan nilai tren maksimum yaitu +3 kejadian, terletak pada koordinat -10 s/d -11 °LS dan 114 °BT di kedalaman 388-453m. Sedangkan nilai minimum tren frekuensi kejadian tahunan MHWs yaitu 0 kejadian terletak pada koordinat -7 s/d -8 °LS dan 114 °BT di kedalaman 109-541m. Nilai 0 pada tren menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut tidak terjadi peningkatan/penurunan durasi selama 27 tahun dan nilai bertanda positif (+) menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut terjadi peningkatan frekuensi kejadian.

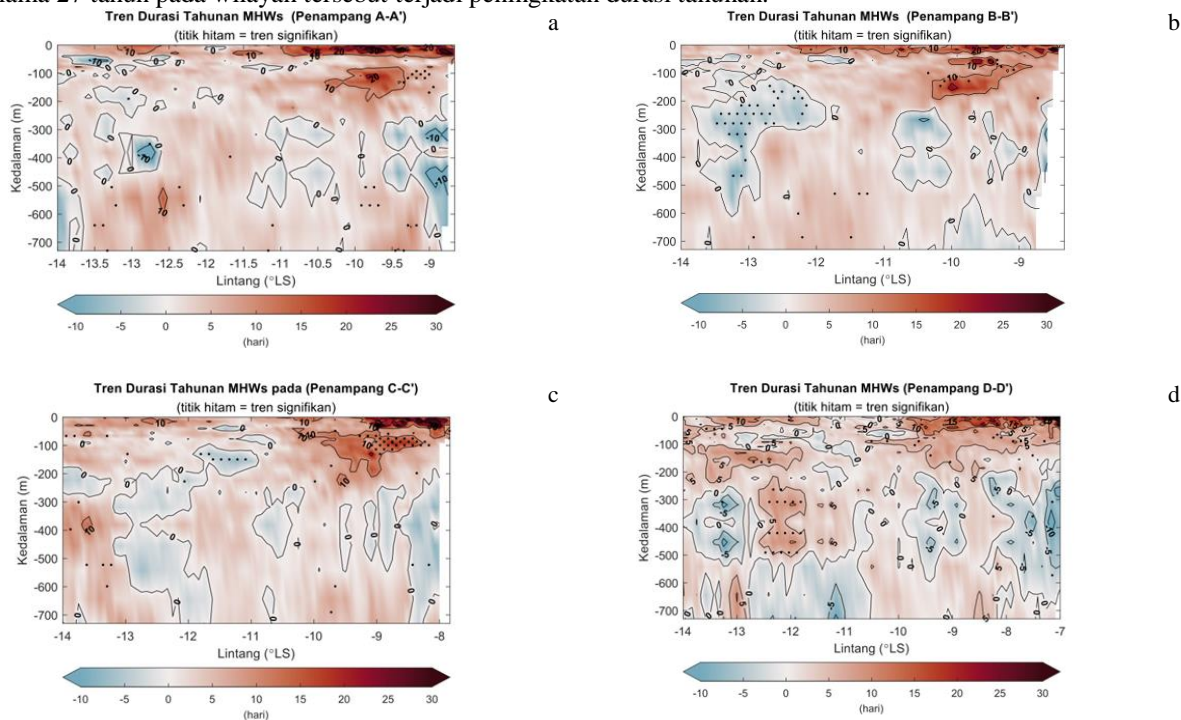




Gambar 6. Tren Frekuensi Kejadian Tahunan MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

3.6. Tren Durasi Tahunan Kejadian MHWs (1993-2019)

Tren durasi tahunan kejadian MHWs pada seluruh penampang (AA', BB', CC', dan DD') dihitung dengan memperkurangkan rata-rata durasi tahun 2007-2019 dengan rata-rata durasi tahun 1993-2005. Pada penampang AA' (Gambar 7a), menunjukkan bahwa nilai minimum tren durasi tahunan MHWs yaitu -10 hari, terletak pada koordinat -9 s/d -9,5 °LS dan 106 °BT di kedalaman 318-763m. Sedangkan nilai maksimum tren durasi tahunan berada pada nilai +20 hari, terletak pada koordinat -9 s/d -11 °LS dan 106 °BT di kedalaman 0,4-40m. Pada penampang BB' (Gambar 7b), menunjukkan bahwa nilai minimum tren durasi tahunan MHWs -10 hari, terletak pada koordinat -9 s/d -9,5 °LS dan 108 °BT di kedalaman 109-643m. Sedangkan nilai maksimum tren durasi tahunan berada pada nilai +20 hari, terletak pada koordinat -12 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 0,4-29m. Pada penampang CC' (Gambar 7c), menunjukkan bahwa nilai minimum tren durasi tahunan MHWs -10 hari, terletak pada koordinat -12 s/d -13 °LS dan 112 °BT di kedalaman 109-763m. Sedangkan nilai maksimum tren durasi tahunan berada pada nilai +30 hari, terletak pada koordinat -8 s/d -9 °LS dan 112 °BT di kedalaman 0,4-29m. Pada Penampang DD'. (Gambar 7d), menunjukkan bahwa nilai minimum tren durasi tahunan MHWs yaitu -10 hari, terletak pada koordinat -7 °LS dan 114 °BT di kedalaman 218-541m. Sedangkan nilai maksimum tren durasi tahunan berada pada nilai +20 hari, terletak pada koordinat -7 °LS dan 114 °BT di kedalaman 0,4-9m. Nilai 0 pada tren menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut tidak terjadi peningkatan/penurunan durasi tahunan, nilai bertanda negatif (-) pada tren menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut terjadi penurunan durasi tahunan, dan nilai bertanda positif (+) menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut terjadi peningkatan durasi tahunan.

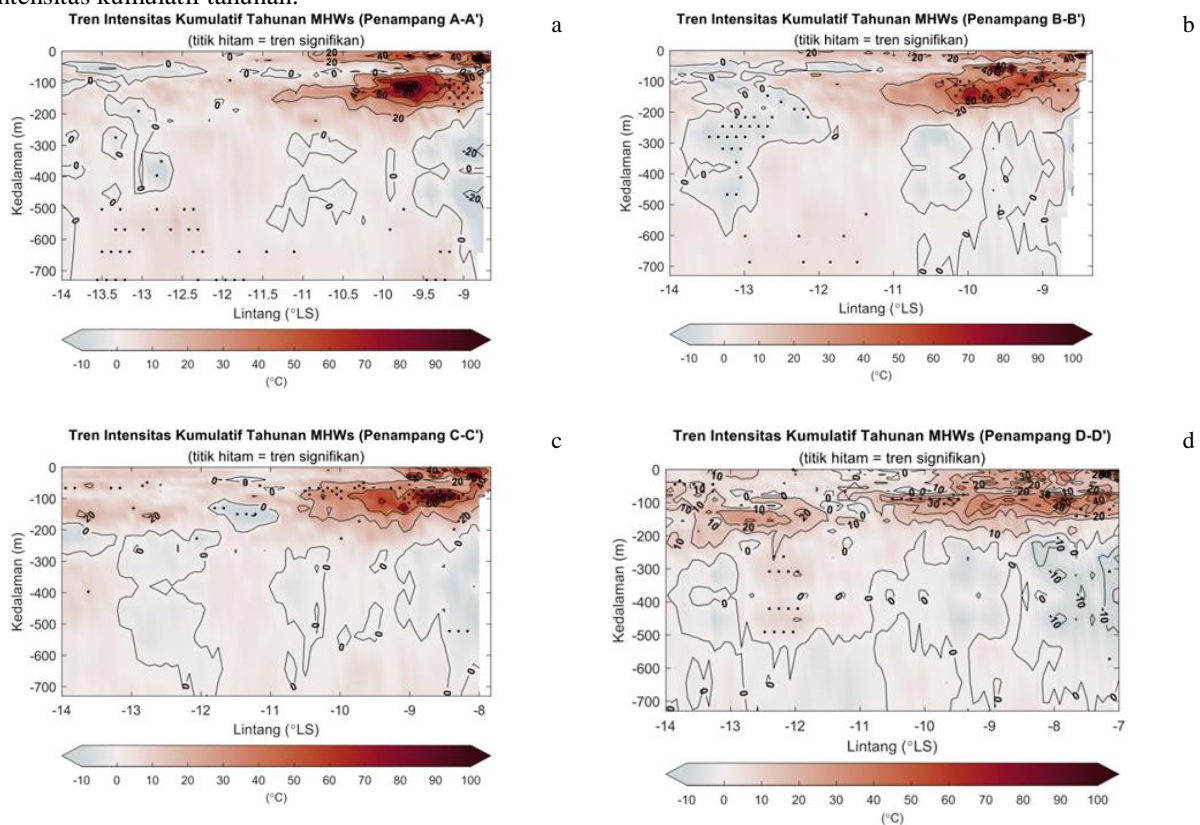


Gambar 7. Tren Durasi Tahunan Kejadian MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

3.7. Tren Intensitas Kumulatif Tahunan Kejadian MHWs (1993-2019)

Tren intensitas kumulatif tahunan kejadian MHWs pada seluruh penampang (AA', BB', CC', dan DD') dihitung dengan memperkurangkan rata-rata durasi tahun 2007-2019 dengan rata-rata durasi tahun 1993-2005. Pada penampang AA' (Gambar 8a), nilai tren intensitas kumulatif maksimum yaitu +100 °C, terletak pada koordinat -10 s/d -10,5 °LS dan 106 °BT di kedalaman 130-155m. Sedangkan nilai tren minimum yaitu -20 °C, terletak pada koordinat -9 s/d -9,5 °LS dan 106 °BT di kedalaman 222-541m. Pada penampang BB' (Gambar 8b), nilai tren intensitas kumulatif maksimum yaitu +60 °C, terletak pada koordinat -9 s/d -10 °LS dan 108 °BT di kedalaman 92-186m. Sedangkan nilai tren minimum yaitu 0 °C, terletak pada koordinat -11,5 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 55-541m. Pada penampang CC' (Gambar 8c), nilai tren intensitas kumulatif maksimum yaitu +80 °C, terletak pada koordinat -8,6 s/d -9 °LS dan 112 °BT di kedalaman 109-130m. Sedangkan nilai tren minimum yaitu 0 °C, terletak pada koordinat -11,5 s/d -14 °LS dan 108 °BT di kedalaman 55-541m. Pada penampang DD' (Gambar 8d), nilai tren intensitas kumulatif maksimum yaitu +40 °C, terletak pada koordinat -7 s/d -8 °LS dan 114 °BT di kedalaman 109-130m. Sedangkan nilai tren minimum yaitu -10 °C, terletak pada koordinat -7 s/d -8 °LS dan 114 °BT di kedalaman 222-453m.

Nilai 0 pada tren menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut tidak terjadi peningkatan/penurunan intensitas kumulatif tahunan selama 27 tahun, nilai bertanda negatif (-) pada tren menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut terjadi penurunan intensitas kumulatif tahunan, dan nilai bertanda positif (+) menunjukkan bahwa selama 27 tahun pada wilayah tersebut terjadi peningkatan intensitas kumulatif tahunan.

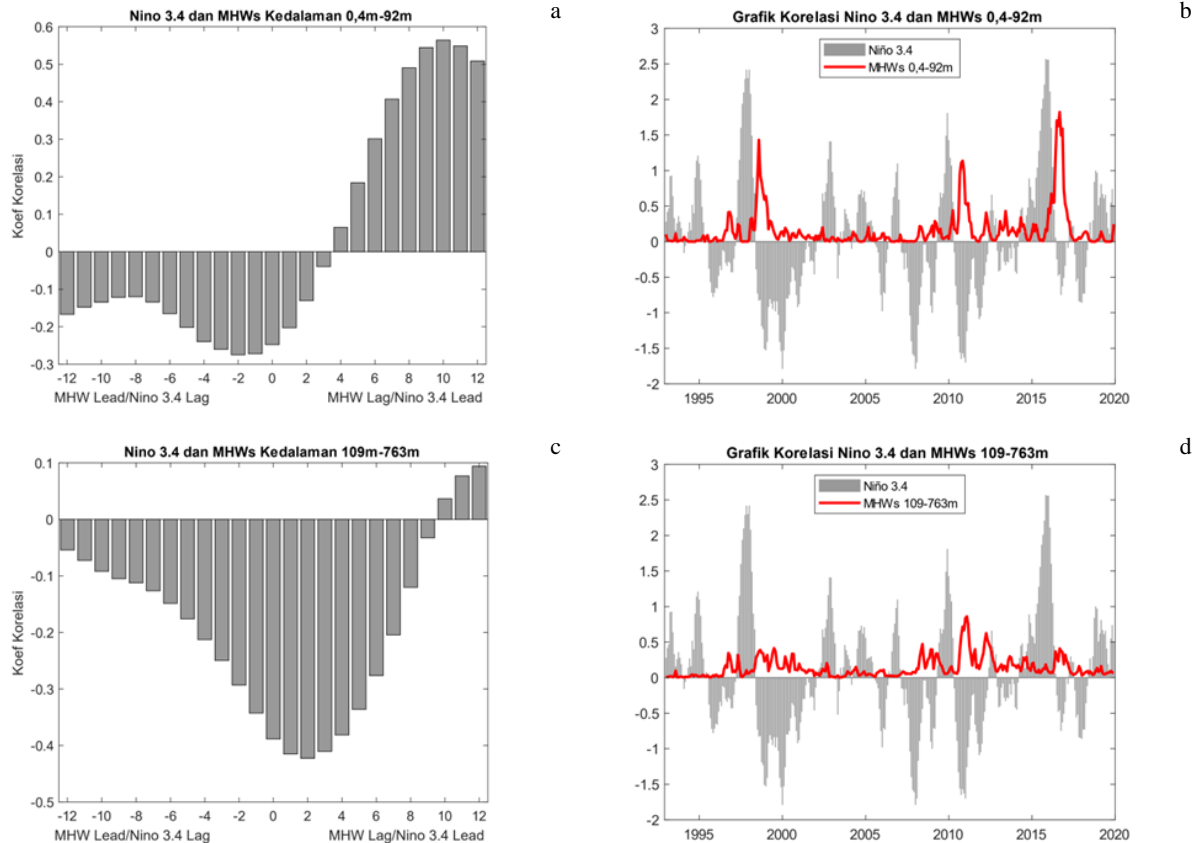


Gambar 8. Tren Intensitas Kumulatif Tahunan Kejadian MHWs selama 27 Tahun pada Kedalaman 0,4-763m. (a) Penampang AA', (b) Penampang BB', (c) Penampang CC', dan (d) Penampang DD'

3.8. Korelasi Fenomena ENSO dan Kejadian MHWs pada Perairan Selatan Jawa

Korelasi antara fenomena *El Niño southern oscillation* (ENSO) dan kejadian MHWs di perairan selatan Jawa dilakukan dengan menggunakan korelasi Pearson. Uji korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas x (volume transpor Arlindo) dan variabel terikat y (intensitas MHWs) yang dinyatakan dengan koefisien korelasi (r). Nilai r dapat bernilai positif (+) atau negatif (-) dan berada pada rentang -1 hingga 1. Jika nilai r mendekati -1 atau 1, maka hubungan keeratan dua variabel semakin kuat. Jika nilainya mendekati 0 maka hubungan keeratan dua variabel semakin lemah. Tanda positif dan negatif pada koefisien korelasi menunjukkan arah hubungan. Koefisien korelasi bertanda positif artinya hubungannya berbanding lurus, dimana semakin tinggi nilai variabel x maka nilai variabel y juga semakin tinggi dan semakin rendah nilai variabel x maka nilai variabel y juga semakin rendah. Koefisien korelasi bertanda negatif artinya hubungannya berbanding terbalik, dimana semakin tinggi nilai variabel x maka nilai variabel y semakin rendah dan semakin

rendah nilai variabel x maka nilai variabel y semakin tinggi. Berdasarkan Gambar 9, diketahui bahwa nilai korelasi antara fenomena ENSO dan MHWs pada kedalaman 0,4-92m bernilai positif dan kedalaman 109-763m bernilai negatif. Pada *Niño 3.4*, indeks positif mengartikan kejadian *El Niño* dan indeks negatif mengartikan kejadian *La Niña*. Koefisien korelasi bernilai positif mengindikasikan bahwa selama terjadinya fenomena *El Niño* di kedalaman 0,4-92m terjadinya peningkatan MHWs di perairan. Sedangkan koefisien korelasi bernilai negatif mengindikasikan bahwa kedalaman 109-763m peningkatan kejadian MHWs di perairan diakibatkan oleh *La Niña*.



Gambar 9. Korelasi Antara Kejadian ENSO dengan Kejadian MHWs. (a) Korelasi silang pada kedalaman 0,4-92m, (b) Grafik korelasi pada kedalaman 0,4-92m, (c) Korelasi silang pada kedalaman 109-763m, dan (d) Grafik korelasi pada kedalaman 109-763m

Secara umum, penyebab MHWs dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori: (i) perubahan pengangkutan panas oleh laut, seperti intensifikasi *boundary current*, (ii) sistem sinoptik atmosfer skala besar yang terjadi secara terus-menerus, dan (iii) proses umpan balik (*feedback*) antara atmosfer-laut seperti peristiwa ENSO (Gupta *et al.*, 2020). Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, kejadian MHWs di selatan Jawa sangat dominan dipengaruhi oleh adanya fenomena skala global interaksi antara atmosfer-laut yaitu ENSO. Pada Gambar 9a diketahui bahwa pada kedalaman 0,4-92m, kejadian MHWs pada perairan selatan Jawa terjadi setelah adanya 7-8 bulan keterlambatan dari fenomena ENSO saat fase *El Niño*. Sedangkan pada kedalaman 109-763m (Gambar 9b), diketahui bahwa kejadian MHWs sampai di perairan selatan Jawa terjadi setelah adanya keterlambatan sebesar 1-3 bulan setelah terjadinya fenomena ENSO saat fase *La Niña*. Menurut (Habibullah, 2022), kejadian *El Niño* sampai ke perairan selatan Jawa dengan keterlambatan 7-8 bulan pada kedalaman termoklin sedangkan kejadian *La Niña* sampai ke perairan selatan Jawa dengan keterlambatan 7-9 bulan pada kedalaman subtermoklin (Li *et al.*, 2020).

MHWs dapat mendorong perubahan mendadak dalam struktur dan fungsi ekosistem secara keseluruhan dan berdampak sangat besar bagi pengguna sumber daya laut yang bergantung pada laut untuk pemanfaatan secara biologis maupun ekologis (Smale *et al.*, 2019). Berdasarkan hasil penelitian (Iskandar *et al.*, 2021) dan (Mandal *et al.*, 2022), kejadian MHWs dengan intensitas paling besar selama tahun 1993-2019 telah terdeteksi terjadi pada tahun 1998 dan tahun 2016. Kedua tahun tersebut merupakan waktu terjadinya fenomena *El Niño* kuat yang mengakibatkan MHWs pada lapisan permukaan berada pada nilai maksimumnya. Selama kejadian *El Niño* di tahun 2016 yang berdampak pada peningkatan temperatur muka laut, konsentrasi klorofil-a di perairan selatan Jawa mengalami penurunan yang sangat besar sehingga akan mempengaruhi produktivitas perikanan tangkap khususnya ikan-ikan pelagis di perairan tersebut (Mandal *et al.*, 2022).

Dalam beberapa dekade terakhir, tren global kejadian MHWs mengalami kenaikan signifikan (Oliver *et al.*, 2018). Tren merupakan laju perubahan suatu variabel selama periode waktu tertentu, dalam penelitian ini perubahan signifikansi tren dinyatakan dengan nilai positif dan negatif. Nilai tren positif menggambarkan bahwa variabel mengalami peningkatan, sedangkan nilai tren negatif menggambarkan bahwa variabel mengalami penurunan pada periode dan wilayah tertentu. Berdasarkan hasil perhitungan tren metrik MHWs (Gambar 8), kejadian MHWs di perairan selatan Jawa menunjukkan adanya peningkatan yang cukup signifikan selama 27 tahun terakhir. Menurut (Spillman *et al.*, 2021), kejadian MHWs di kawasan Indo-Pasifik mengalami peningkatan *onset rate* (nilai laju perubahan suhu dari awal munculnya kejadian MHWs hingga sampai pada intensitas maksimumnya) dengan *offset rate* (nilai laju peluruhan kejadian MHWs dari intensitas maksimumnya hingga kembali pada nilai klimatologisnya). Dalam beberapa tahun mendatang bersamaan dengan terjadinya pemanasan global, kejadian MHWs diproyeksikan akan semakin signifikan terjadi (Oliver *et al.*, 2019).

4. Kesimpulan

Kejadian *marine heatwaves* di perairan selatan Jawa telah terdeteksi hingga pada lapisan kedalaman 763m. Untuk melihat hal tersebut digunakan metrik untuk mendeskripsikan kejadian MHWs dengan lebih komprehensif, metrik tersebut antara lain yaitu frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif tahunan. Dalam kurun waktu selama 27 tahun (1993-2019), tren kejadian MHWs terus mengalami peningkatan. Adapun faktor utama yang menyebabkan kejadian MHWs di perairan ini adalah fenomena ENSO, pada kedalaman 0,4-92m kejadian MHWs diakibatkan oleh adanya fenomena *El Niño* dengan keterlambatan 7-8 bulan, dan pada kedalaman 109-763m kejadian MHWs diakibatkan oleh fenomena *La Niña* dengan keterlambatan 1-3 bulan.

5. Saran

Dalam penelitian ini, data suhu perairan yang digunakan adalah data model asimilasi global. Sehingga dalam penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan data primer (data lapangan), baik dalam pengolahannya maupun yang akan digunakan dalam validasi data. Kemudian, beberapa faktor dalam skala lokal penyebab terjadinya MHWs juga dapat diteliti untuk penelitian-penelitian selanjutnya sehingga akan diketahui dengan lebih detail faktor penyebab MHWs di perairan Indonesia.

6. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Korea-Indonesia MTCRC (Marine Technology Cooperation Research Center) Scholarship atas pendanaan selama penelitian dilakukan. Serta ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Copernicus Marine Service dan NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration) atas penyediaan serta akses data yang digunakan dalam penelitian ini.

7. Referensi

- Collins, M., Sutherland, M., Bouwer, L., Cheong, S.M., Frölicher, T., Combes, H.J. Des, Roxy, M.K., Losada, I., McInnes, K., Ratter, B., Rivera-Arriaga, E., Susanto, R.D., Swingedouw, D., & Tibig, L. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. In H.O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, M.T.P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N.M. Weyer (Ed.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (hal. 589–655).
- Gupta, A. Sen, Thomsen, M., Benthuisen, J. A., Hobday, A. J., Oliver, E., Alexander, L. V., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S., Moore, P. J., Rodrigues, R. R., Scannell, H. A., Taschetto, A. S., Ummenhofer, C. C., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2020). Drivers and impacts of the most extreme marine heatwaves events. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75445-3>
- Habibullah, A.D. (2022). *The Analysis of Trend and Variability of Marine Heatwaves in Indonesia 1983-2020*. [Tesis]. Institut Teknologi Bandung.
- Hobday, 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., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, *141*, 227–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08618>
- Li, M., Gordon, A.L., Gruenburg, L.K., Wei, J., & Yang, S. (2020). Interannual to Decadal Response of the Indonesian Throughflow Vertical Profile to Indo-Pacific Forcing. *Geophysical Research Letters*, *47*(11), e2020GL087679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL087679>

- Mandal, S., Susanto, R.D., & Ramakrishnan, B. (2022). On Investigating the Dynamical Factors Modulating Surface Chlorophyll-a Variability along the South Java Coast. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071745>
- Oliver, E.C. J., Burrows, M.T., Donat, M.G., Sen Gupta, A., Alexander, L. V, Perkins-Kirkpatrick, S.E., Benthuyesen, J.A., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Moore, P. J., Thomsen, M.S., Wernberg, T., & Smale, D.A. (2019). Projected Marine Heatwaves in the 21st Century and the Potential for Ecological Impact. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00734>
- Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T., Moore, P.J., Smale, D.A., Alexander, L.V, Benthuyesen, 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), 1324. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Smale, D.A., Wernberg, T., Oliver, E.C.J., Thomsen, M., Harvey, B.P., Straub, S.C., Burrows, M.T., Alexander, L.V, Benthuyesen, J.A., Donat, M.G., Feng, M., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Payne, B. L., & 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>
- Spillman, C.M., Smith, G.A., Hobday, A.J., & Hartog, J.R. (2021). Onset and Decline Rates of Marine Heatwaves: Global Trends, Seasonal Forecasts and Marine Management. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.801217>