

ANALISIS SPASIAL RISIKO PEMUTIHAN TERUMBU KARANG DI WPP INDONESIA MENGGUNAKAN DATA KEJADIAN *MARINE HEATWAVES*

Nabila Afifah Azuga¹, Ahmad Dhuha Habibullah², Najwan Al-Ghifari³

¹Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Riau, Pekanbaru (28293)

²Program Studi Magister Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Bandung (40132)

³Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman, Samarinda (75119)

E-mail korespondensi: Nabila.afifahazuga@lecturer.unri.ac.id

ABSTRAK

Terumbu karang yang tersebar di Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) Indonesia merupakan salah satu pusat keanekaragaman hayati laut dunia yang semakin terancam akibat meningkatnya kejadian *marine heatwaves* (MHWs). Fenomena ini berdampak langsung terhadap kesehatan ekosistem terumbu karang, khususnya dalam memicu risiko pemutihan karang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat risiko pemutihan terumbu karang di WPP Indonesia melalui pendekatan spasial menggunakan data suhu permukaan laut (SPL) selama 43 tahun (1982-2020). Tiga metrik utama digunakan untuk merepresentasikan kejadian MHWs, yaitu frekuensi kejadian, intensitas kumulatif, dan durasi kumulatif. Ketiga metrik ini diolah menggunakan metode statistik berbasis persentil ke-90 dan dikaitkan dengan distribusi terumbu karang untuk menghitung skor risiko pemutihan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi kejadian MHWs tertinggi (>2.5 kejadian/tahun) berada di wilayah timur Indonesia (Laut Arafura dan Laut Banda), sedangkan intensitas dan durasi kumulatif tertinggi berada di selatan Jawa hingga Laut Timor. Luas area terdampak paling dominan ditemukan di Sumbarsel (899 km²), Wakatobi (715 km²), dan Laut Jawa bagian utara. Skor risiko pemutihan tertinggi terdapat di WPP 718 (0.91), diikuti oleh WPP 573 (0.90), dan WPP 711 (0.89), menunjukkan pola kerentanan kompleks dan bervariasi secara spasial. Skor dihitung menggunakan formula berbobot dengan menggunakan frekuensi kejadian sebagai faktor dominan. Dengan adanya perhitungan faktor risiko ini, diharapkan dapat menjadi upaya adaptasi dan mitigasi yang tepat untuk mencegah terjadinya kerusakan terumbu karang secara masif. Melalui hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar yang kuat dalam upaya pengelolaan ekosistem laut yang adaptif dan responsif terhadap perubahan iklim, khususnya di wilayah perairan Indonesia.

Kata kunci: WPP Indonesia; suhu permukaan laut; pemanasan global; *marine heatwaves*; pemutihan terumbu karang.

ANALYSIS OF CORAL BLEACHING RISK IN INDONESIA'S FISHERIES MANAGEMENT AREA (FMA) USING MARINE HEATWAVES DATA

ABSTRACT

Coral reefs across Indonesia's Fisheries Management Area (FMA) are key centers of marine biodiversity, increasingly threatened by marine heatwaves (MHWs). This phenomenon directly affects coral reef ecosystems, particularly in triggering coral bleaching. This study aims to analyze the risk score of coral bleaching in Indonesia's FMA through a spatial approach using sea surface temperature (SST) data over 43 years (1982-2020). Three main metrics were used to represent MHWs events: frequency, cumulative intensity, and cumulative duration. These metrics were processed using a 90th percentile-based statistical method and correlated with coral reefs distribution to calculate bleaching risk scores. The results indicate that the highest frequency of MHWs (>2.5 events/year) occurred in eastern Indonesia (Arafura and Banda Sea), while the highest cumulative intensity and duration values were found in southern Java to the Timor Sea. The results of this study indicate that the highest frequency of MHWs events (>2.5 events/year) is in eastern Indonesia (Arafura Sea and Banda Sea), while the highest cumulative intensity and duration values were in the southern region of Java to the Timor Sea. Areas most affected by coral bleaching include South Sumatra (899 km²), Wakatobi (715 km²), and the northern Java Sea. The highest bleaching risk scores were found in FMA 718 (0.91), followed by FMA 573 (0.90) and FMA 711 (0.89), showing complex and spatially varied vulnerability. These scores were calculated using a weighted formula with MHWs frequency as the dominant factor. This research provides a foundation for adaptive marine ecosystem management efforts, particularly in Indonesian waters.

Keywords: fisheries management area Indonesia; sea surface temperature; global warming; coral bleaching.

PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki ekosistem terumbu karang yang sangat luas dan kaya akan keanekaragaman hayati. Dengan lebih dari 60% wilayahnya berupa perairan, Indonesia memiliki sekitar 18% dari total terumbu karang di dunia, mencakup ribuan spesies karang, ikan, dan organisme laut lainnya (Farid et al., 2018). Keberadaan terumbu karang di wilayah pesisir memberikan pengaruh yang cukup signifikan, hal ini disebabkan karena terumbu karang memiliki fungsi ekologis dan ekonomi. Adapun fungsi ekologis dari ekosistem ini adalah sebagai pelindung terhadap ombak maupun gelombang tinggi yang dapat menyebabkan abrasi, sebagai tempat berlindung, tempat pemijahan, tempat penyedia nutrient, dan tempat asuhan untuk berbagai biota karang. Sedangkan fungsi ekonomi yang diberikan adalah sebagai tempat untuk para nelayan mencari dan menangkap ikan-ikan karang (Cahyani et al., 2018; Dahuri *dalam* Farid et al., 2018).

Akan tetapi dengan semakin meningkatnya suhu global secara terus-menerus mengakibatkan ancaman serius bagi keberlanjutan ekosistem terumbu karang. Salah satu ancaman terbesar yang timbul dari fenomena pemanasan global adalah kejadian *marine heatwaves* (MHWs). MHWs merupakan gelombang panas laut yang terjadi saat derajat panas air laut berada di atas nilai ambang persentil ke-90 dari rata-rata klimatologisnya dan bertahan di perairan selama lima hari secara berturut-turut (Hobday et al., 2016; Manta et al., 2018). Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh (Hu et al., 2021; Azuga & Radjawane, 2022; Yao & Wang, 2024) telah ditemukan bahwa kenaikan suhu air laut akibat terjadinya MHWs mampu merambat hingga ke lapisan laut pada kedalaman hingga 300 m, hingga pada gilirannya dapat memicu terjadi fenomena pemutihan karang (Nadimpalli et al., 2025). Dalam kondisi ini, karang yang biasanya bergantung pada zooxanthellae yang merupakan alga simbiotik pemberi warna dan menyediakan sebagian besar energi untuk karang akan mengalami stres berat. Alga ini kemudian akan kehilangan kemampuan untuk bertahan hidup dan menjadi sangat rentan terhadap kematian massal, hingga akhirnya berdampak pada degradasi kesehatan ekosistem secara keseluruhan (Simarangkir et al., 2015; Dedi et al., 2016; Hooidonk et al., 2016).

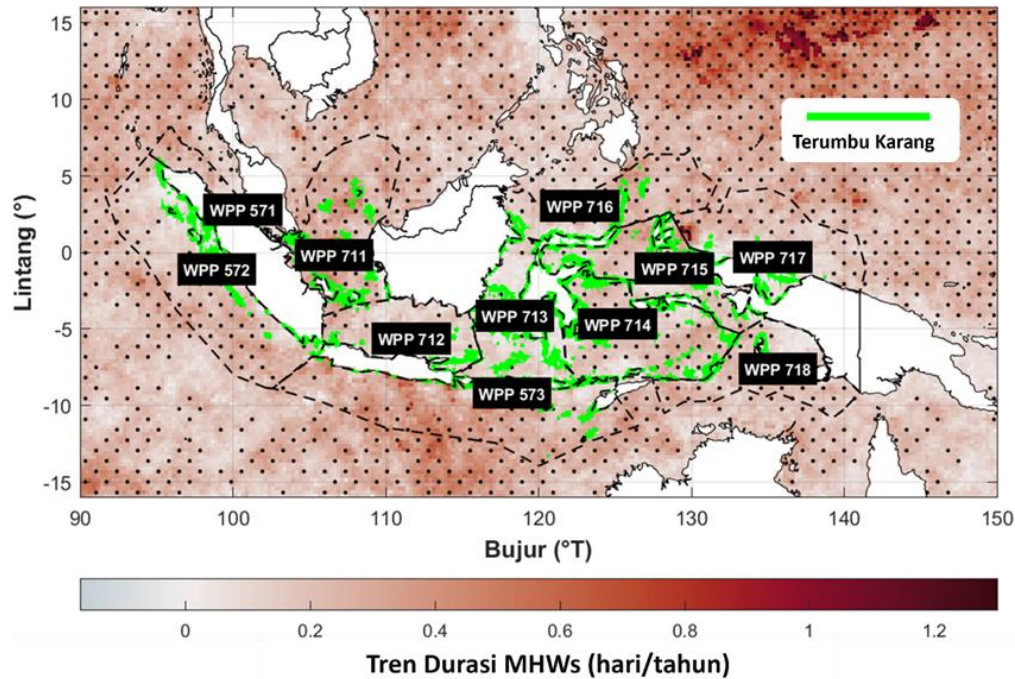
Seiring dengan meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian MHWs, diperlukan adanya pengembangan metode yang lebih efektif untuk mengidentifikasi wilayah perairan dengan risiko tinggi terhadap kerusakan ekosistem terumbu karang, sebagai bagian dari upaya konservasi, adaptasi, dan mitigasi perubahan iklim. Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan dan berfokus pada upaya mitigasi dan adaptasi terhadap dampak perubahan iklim pada distribusi ekosistem terumbu karang, seperti pemetaan spasial ekosistem terumbu karang (Nagi et al., 2024; Napitupulu et al., 2025) dan melakukan berbagai upaya transplantasi karang yang telah mati (Firihi et al., 2022). Akan tetapi, sebagian besar dari penelitian-penelitian sebelumnya hanya terfokus pada kajian dampak pemutihan terumbu karang secara masif melalui analisis spasial dan menggunakan skor *Degree Heating Weeks* (DHW) seperti yang dilakukan oleh (Kimura et al., 2018; De Clippele et al., 2023; Mason et al., 2025) dan belum terdapat penelitian untuk secara khusus melakukan pemetaan skor risiko pemutihan terumbu karang yang diintegrasikan dengan data jangka panjang kejadian MHWs. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memberikan gambaran spasial mengenai skor risiko pemutihan terumbu karang dengan mengintegrasikannya dengan tiga metrik utama MHWs yaitu frekuensi kejadian, intensitas rata-rata, dan durasi kumulatif. Sehingga dapat menjadi salah satu upaya dalam melakukan konservasi, adaptasi, dan mitigasi dari perubahan iklim yang menyebabkan terjadinya pemutihan pada terumbu karang.

METODE

Sumber Data

Dalam penelitian ini digunakan tiga *dataset* utama yang digunakan untuk menghitung skor risiko pemutihan terumbu karang serta untuk menganalisis kaitannya dengan kejadian MHWs. Untuk melakukan perhitungan dan deteksi kejadian MHWs digunakan data jangka panjang suhu permukaan laut (SPL) dengan resolusi spasial 0.25° selama 43 tahun (1982-2020) dari *Daily NOAA Optimum Interpolation SST* (OISST) v2.1 dan diunduh melalui situs <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>. Data SPL ini sangat cocok untuk digunakan dalam melakukan analisis regional dan global, namun untuk analisis di tingkat lokal atau wilayah yang lebih spesifik perlu menggunakan data dengan resolusi spasial yang lebih baik. Selanjutnya, untuk menentukan distribusi spasial terumbu karang, digunakan *dataset* global yang

diperoleh dari UNEP World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC) dan WorldFish Centre dalam periode yang sama yakni tahun 1982-2020, data ini dapat diakses melalui situs <https://pacificdata.org/data/dataset/global-distribution-of-coral-reefs>. Dalam menentukan batas wilayah WPP Indonesia, digunakan data batasan 11 WPP RI yang diperoleh dari Kementerian Perikanan dan Kelautan (KKP) Indonesia, data dapat diunduh melalui <https://tanahair.indonesia.go.id/sdi/dataset/igt-wilayah-pengelolaan-perikanan-negara-republik-indonesia-250k-ar>. Adapun wilayah kajian yang diteliti adalah seluruh WPP Indonesia, yang berada dalam koordinat 90-150 °BT dan 16 °LS – 16 °LU. Sebagai gambaran lebih jelas, wilayah penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta wilayah kejadian yang menunjukkan tren durasi kejadian MHWs tahun 1982-2020 dan distribusi terumbu karang di WPP Indonesia. Warna merah adalah tren durasi MHWs, warna hijau adalah distribusi terumbu karang, dan dot hitam adalah P value ($p < 0.05$).

Deteksi Kejadian *Marine Heatwaves*

Tahapan pertama dalam deteksi kejadian MHWs adalah menghitung rata-rata klimatologi SPL dari data DOISST v2.1 yang telah diunduh sebelumnya. Data-rata klimatologi tersebut dihitung berdasarkan periode referensi tahun 1991-2020 (30 tahun). Adapun persamaan dalam menghitung klimatologi SPL mengacu pada (Hobday et al., 2016) dan dijelaskan dalam 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 klimatologi (°C)
- j = hari dalam setahun
- y_s = tahun mulai
- y_e = tahun akhir
- T = suhu perairan (°C)

Tahapan berikutnya yaitu melakukan deteksi kejadian MHWs dengan nilai ambang persentil ke-90. Adapun perhitungan yang digunakan dinyatakan pada persamaan berikut:

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

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

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

Selanjutnya, dilakukan penyusunan kategori tingkat keparahan kejadian MHWs mulai dari kategori sedang, kuat, parah, dan ekstrem dengan nilai ambang pengkali P_{90} yang merujuk pada penelitian Hobday et al. (2018).

Analisis Metrik Kejadian *Marine Heatwaves*

Untuk menjelaskan kejadian MHWs secara lebih rinci, perlu digunakan berbagai metrik. Dalam penelitian ini digunakan tiga metrik utama, yaitu frekuensi kejadian yang merupakan jumlah kejadian MHWs dalam satu tahun (kejadian/tahun), selanjutnya intensitas kumulatif yaitu jumlah seluruh intensitas MHWs sepanjang durasi kejadian MHWs ($^{\circ}\text{C}$), dan durasi kumulatif yakni jumlah hari dalam satu tahun kejadian MHWs (hari).

Perhitungan Skor Risiko Pemutihan Terumbu Karang

Skor risiko pemutihan terumbu karang terlebih dahulu dinormalisasikan melalui perhitungan setiap *grid cell* menggunakan rumus berbobot yang menggabungkan tiga metrik kejadian MHWs. Pembobotan ini merupakan asumsi yang didasarkan dari berbagai penelitian dan tinjauan literatur dengan tingkat validitas yang tinggi. Hal ini dipaparkan oleh Hughes et al. (2018) dan Sully et al. (2019) dalam penelitiannya yang menjelaskan bahwa MHWs dengan frekuensi yang tinggi dapat mengakibatkan degradasi pada terumbu karang akibat adanya tekanan panas yang berulang pada ekosistem tersebut. Adapun bobot utama adalah metrik frekuensi kejadian MHWs. Di mana, metrik ini memiliki pengaruh paling dominan terhadap terjadinya pemutihan terumbu karang. Perhitungan ini diadaptasi dari metodologi klasifikasi tingkat keparahan MHWs dari Hobday et al. (2018), dapat dirumuskan sebagai berikut:

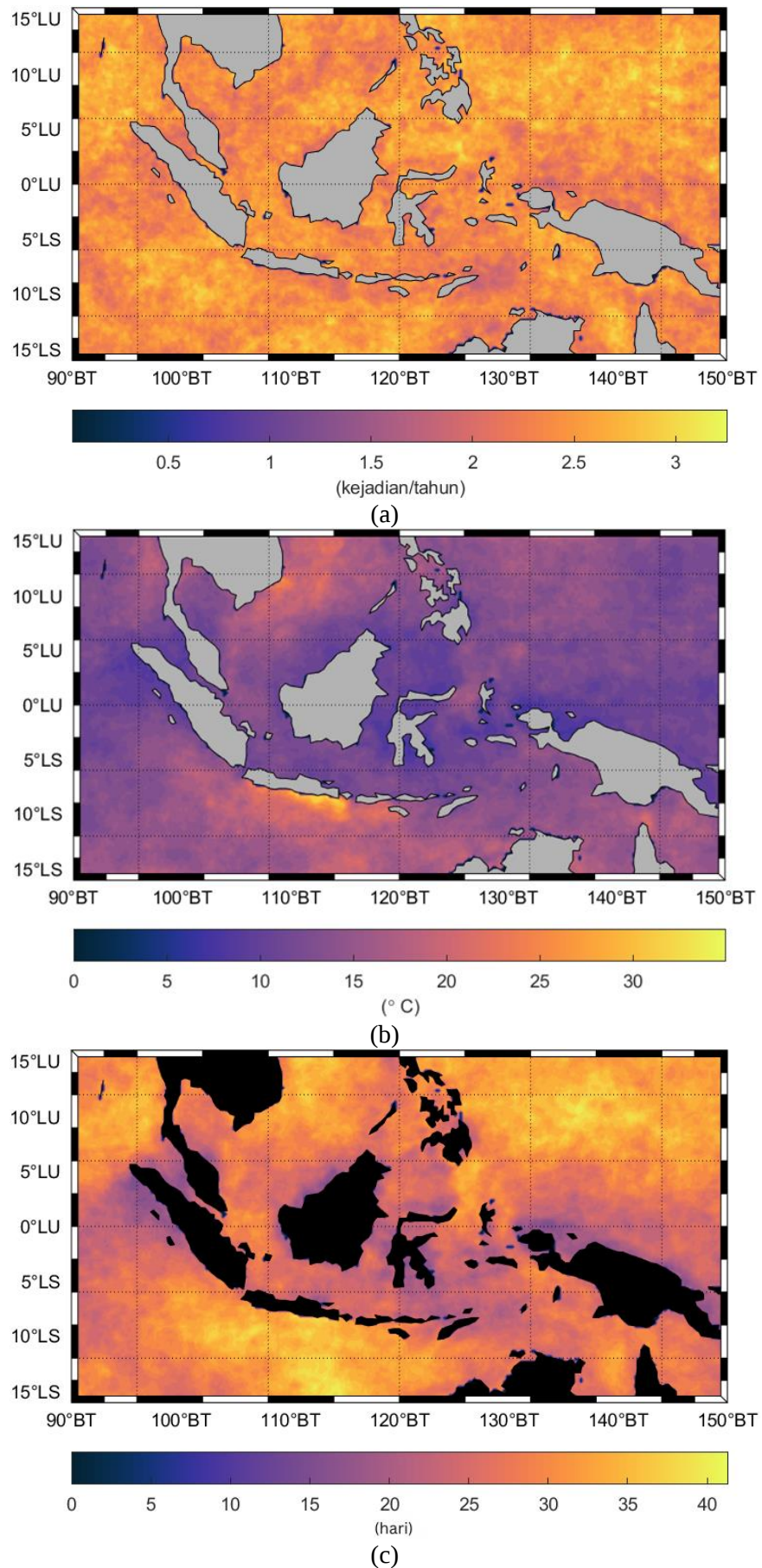
$$\text{Skor risiko} = 0.5 \cdot \frac{\text{Frekuensi}}{\text{Ambang batas } P_{90}} + 0.3 \cdot \frac{\text{Intensitas}}{\text{Ambang batas } P_{90}} + 0.2 \cdot \frac{\text{Durasi}}{\text{Ambang batas } P_{90}}$$

Setiap metrik yang dihitung dinormalisasikan dengan nilai P_{90} yang berfungsi sebagai nilai ambang batas untuk kondisi ekstrem pada setiap *grid cell* yang terdapat di area studi. Proses normalisasi nilai ini dilakukan untuk memungkinkan adanya penggabungan dari berbagai satuan berbeda menjadi skor risiko yang memiliki tingkatan yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kejadian *Marine Heatwaves* di Indonesia

Perubahan iklim yang tidak menentu, meningkatnya fenomena pemanasan global, dan tingginya aktivitas antropogenik manusia merupakan faktor dominan yang menyebabkan kerusakan pada kondisi lingkungan, termasuk ekosistem laut. Dengan meningkatnya ancaman dan pencemaran yang masuk ke dalam perairan laut dapat mengakibatkan kenaikan suhu air laut ekstrem — *marine heatwaves* (MHWs). Berdasarkan penelitian terdahulu oleh (Azuga & Radjawane, 2022; Habibullah et al., 2023; Beliyana et al., 2023) kejadian MHWs di Indonesia telah teridentifikasi secara historis sejak tahun 1982 hingga 2020 dan diketahui pada tahun 1998 dan 2016, wilayah perairan Indonesia mengalami kondisi MHWs yang tergolong dalam kategori ekstrem. Secara spasial, dalam kurun waktu selama 43 tahun, melalui analisis metrik kejadian MHWs, fenomena ini telah terdeteksi di hampir seluruh wilayah perairan Indonesia dengan skala yang bervariasi. Adapun visualisasi metrik kejadian MHWs dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Visualisasi metrik kejadian *marine heatwaves* sepanjang 43 tahun (1982-2020) di Indonesia. (a) rata-rata frekuensi kejadian MHWs; (b) rata-rata intensitas kumulatif MHWs, dan (c) rata-rata durasi kumulatif MHWs.

Frekuensi kejadian MHWs merupakan jumlah kejadian MHWs di suatu wilayah yang terjadi dalam satu tahun (Hobday et al., 2016). Berdasarkan informasi yang diperoleh dari Gambar 2a dapat dilihat bahwa secara spasial wilayah perairan Indonesia mengalami 2 hingga 3 kejadian MHWs per tahun. Melalui visualisasi spasial ini dapat diketahui bahwa wilayah yang paling sering mengalami kejadian MHWs dengan jumlah frekuensi lebih dari 2.5 kejadian per tahun berada di bagian timur Indonesia yang dilewati oleh Arus Lintas Indonesia (Arlindo), seperti di Laut Banda, Laut Arafura, Laut Maluku bagian Tengah, dan perairan sekitar Laut Flores. Sementara itu, wilayah perairan Indonesia yang mengalami frekuensi kejadian sekitar 0.5 hingga 2 kejadian per tahun berada di sekitar Laut Jawa, Selat Makassar, bagian barat Sumatera, dan sebagian besar wilayah barat Indonesia. Hal ini memperlihatkan bahwa transpor panas dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia memainkan peranan penting dalam mendorong terjadinya MHWs di Indonesia (Azuga & Radjawane, 2022). Dinamika variabilitas iklim global seperti fenomena *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) dapat mendorong terjadinya penguatan ataupun pelemahan dari aliran Arlindo, di mana saat terjadinya fenomena ENSO fase *La Niña* transpor Arlindo ditemukan menguat, sedangkan saat terjadinya fase *El Niño* aliran transpor Arlindo ditemukan melemah. Pola yang sama terjadi ketika berlangsungnya peristiwa IOD, di mana saat IOD fase positif transpor massa air semakin kuat sedangkan saat terjadinya peristiwa IOD negatif transpor massa air melemah (Liu et al., 2015).

Selanjutnya, intensitas kumulatif MHWs yang merupakan penjumlahan dari intensitas harian MHWs dalam satu kejadian. Jika diamati distribusi spasial rata-rata intensitas kumulatif kejadian MHWs yang ditunjukkan oleh Gambar 2b dapat ditemukan bahwa rata-rata intensitas kumulatif MHWs di perairan Indonesia dan sekitarnya adalah 10 °C hingga 35 °C, dengan akumulasi nilai tertinggi berada di bagian selatan Indonesia, khususnya perairan selatan Jawa, Bali, Nusa Tenggara, hingga Laut Timor. Adapun penyebab lebih tingginya intensitas kumulatif di kawasan ini adalah adanya fenomena variabilitas interannual seperti *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) (Iskandar et al., 2021; Ismail, 2021; Beliyana et al., 2023), selain itu pada wilayah ini juga sering mengalami musim *upwelling* tahunan akibat adanya angin monsun timur, akan tetapi akibat perubahan iklim kemampuan laut untuk mendingin semakin melemah, sehingga pada kawasan ini terjadi penumpukan panas di permukaan laut yang menyebabkan intensitas panas menjadi lebih tinggi (Trenberth et al., 2014). Sedangkan pada sebagian besar wilayah perairan utara Indonesia seperti Laut Natuna, Selat Malaka, dan sebagian laut Sulawesi menunjukkan intensitas kumulatif yang lebih rendah yakni sekitar 10 °C hingga 15 °C. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh tingginya input air tawar dari sungai besar yaitu Sungai Kapuas dan Sungai Mahakam yang diduga dapat menghambat peningkatan suhu ekstrem di laut. Lebih dari itu, pada wilayah ini juga lebih sering terjadi *vertical mixing* akibat pergerakan angin dan arus lokal secara dinamis (Sprintall et al., 2014).

Durasi kumulatif merupakan jumlah hari dalam satu tahun selama kejadian MHWs berlangsung. Jumlah hari tersebut dapat bersumber dari satu ataupun lebih kejadian MHWs yang terpisah, akan tetapi terjadi pada tahun yang sama. Selama 43 tahun data penelitian, diperoleh informasi bahwa rata-rata durasi kumulatif pada wilayah perairan Indonesia berkisar antara 5 hingga 40 hari, ditunjukkan oleh Gambar 2c. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa wilayah dengan durasi kumulatif tertinggi berada di perairan selatan Indonesia, terutama bagian selatan Jawa, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Laut Timur, dan sebagian Laut Banda. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pada wilayah tersebut tidak hanya mengalami frekuensi kejadian yang tinggi, namun juga cenderung berlangsung dalam durasi yang lebih lama dibandingkan dengan daerah lainnya. Adapun beberapa hal yang diduga dapat memicu tingginya durasi kumulatif di kawasan ini adalah adanya Arlindo, fenomena ENSO, dan IOD yang dapat memperkuat bahkan memperlama terjadinya MHWs di laut (Sprintall et al., 2014; Iskandar et al., 2021). Keadaan yang berbeda terjadi di wilayah barat Sumatera, utara Kalimantan, utara Papua, sebagian Laut Sulawesi, serta Laut Maluku yang menunjukkan durasi kumulatif MHWs lebih singkat yakni berkisar antara 5 hingga 15 hari.

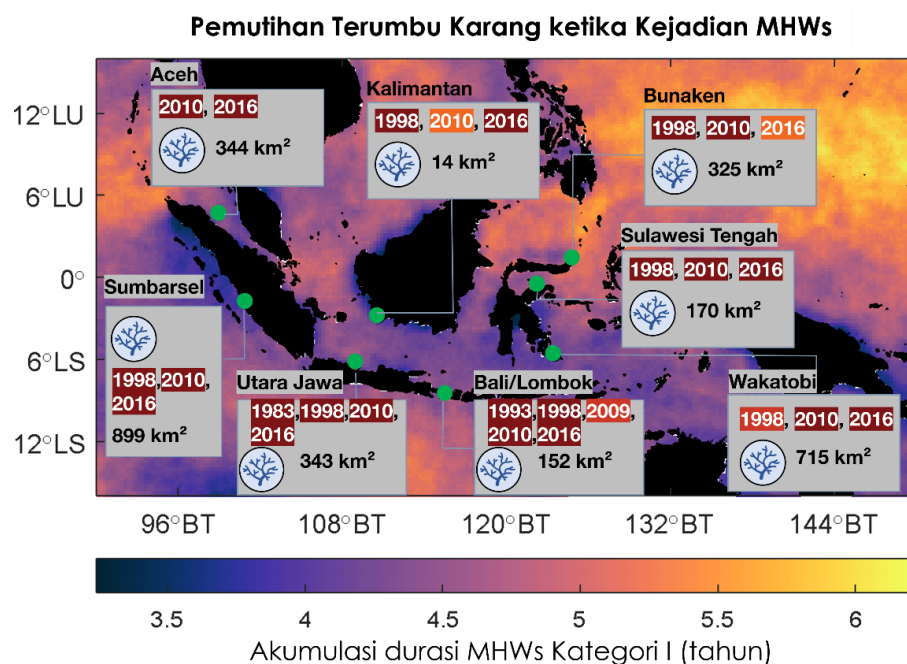
Pemutihan Terumbu Karang saat Terjadinya *Marine Heatwaves*

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem laut yang sangat rentan terhadap *thermal stress*, yaitu tekanan lingkungan akibat adanya kenaikan suhu air laut di atas ambang toleransinya secara fisiologis (Carballo-Bolaños et al., 2020; Rosic et al., 2020). Adanya perubahan berupa peningkatan suhu secara ekstrem dan terus menerus seperti adanya kejadian MHWs dapat mengganggu hubungan simbiotik biologis antara karang dan zooxanthellae — alga yang memberikan warna pada terumbu karang (Faiqoh et al., 2019; Nagi et al., 2024; Napitupulu et al., 2025).

Kejadian pemutihan terumbu karang di WPP RI dalam penelitian ini menunjukkan adanya degradasi terhadap terumbu karang secara signifikan hampir di seluruh wilayah perairan Indonesia (Gambar 1). Secara spasial, wilayah Sumatera bagian selatan (Sumbarsel) teridentifikasi sebagai kawasan perairan dengan total luasan pemutihan terumbu karang terbesar yakni mencapai 899 km², yang terjadi selama peristiwa MHWs dalam kategori ekstrem (ditunjukkan oleh kotak merah) pada tahun 1998, 2010, dan 2016. Periode tersebut bertepatan dengan terjadinya ENSO fase El Niño dan IOD saat fase positif (Azuga dan Radjawane, 2022). Pola yang serupa juga terlihat di perairan Wakatobi yang berada di pusat Segitiga Karang (*Coral Triangel*) dengan luas pemutihan karang sebesar 715 km². Kawasan ini juga mengalami pemutihan karang pada tahun-tahun yang sama, akan tetapi pada tahun 1998 di wilayah ini, MHWs yang terdeteksi berada dalam kategori sedang (ditunjukkan oleh kotak oranye), hal ini menjelaskan bahwa terdapat keterkaitan erat antara fenomena ENSO dan IOD dalam memicu kerusakan ekosistem terumbu karang (McGowan & Theobald, 2017).

Pada wilayah perairan Bali dan Lombok tampak adanya variasi dalam periode terjadinya MHWs yang mengakibatkan pemutihan terumbu karang seluas 152 km². Secara historis tampak bahwa pemutihan terumbu karang tidak hanya muncul pada tahun-tahun terjadinya fenomena ENSO dan IOD kuat namun juga terjadi pada tahun 1993 dan 2009 yang menurut Beliyana et al. (2023) dan Azuga et al. (2020) bukan merupakan periode terjadinya ENSO dan IOD kuat. Sehingga dapat dijelaskan bahwa adanya degradasi terumbu karang pada wilayah ini dapat diakibatkan oleh faktor lokal lain seperti adanya *upwelling* musiman dan faktor antropogenik manusia (Li et al., 2024).

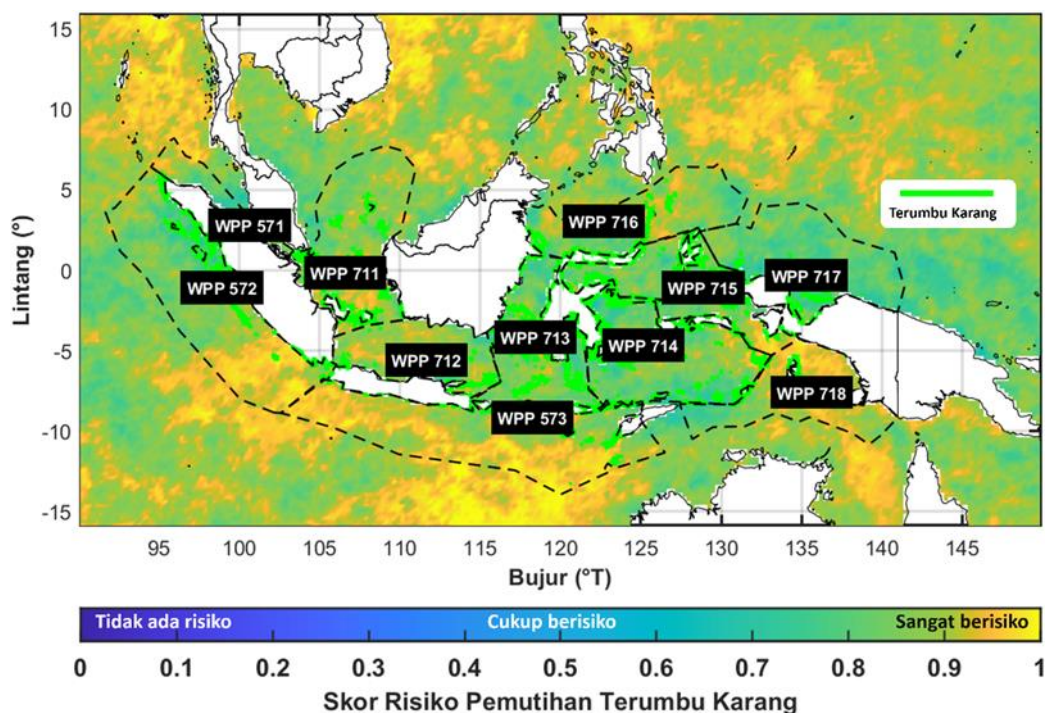
Selanjutnya, wilayah perairan bagian utara dari laut Jawa juga mengalami degradasi terumbu karang seluas 343 km² yang terjadi di tahun 1993, 1998, 2010, dan 2016. Berdasarkan Gambar 3 juga dapat terlihat bahwa terumbu karang di perairan Aceh mengalami kerusakan seluas 344 km² yang terjadi pada tahun 2010 dan 2016. Sementara itu, kondisi ekosistem terumbu karang yang mengalami pemutihan di wilayah perairan Kalimantan menunjukkan luasan area terdampak yang relatif kecil yakni 14 km² yang terjadi pada tahun 1998, 2010, dan 2016. Pada wilayah laut Bunaken (Sulawesi Utara) terjadi pemutihan karang yang cukup signifikan pada tahun 1998, 2010, dan 2016. Wilayah perairan Sulawesi Tengah juga mengalami pemutihan pada periode yang sama dengan luas terdampak mencapai 170 km². Sedangkan Wakatobi, yang merupakan salah satu kawasan konservasi laut utama di Indonesia juga mengalami pemutihan terumbu karang pada tahun 2010 dan 2016 dengan luas area terdampak cukup besar yaitu sekitar 715 km². Jika dilihat berdasarkan periode kejadian MHWs, terjadinya degradasi pada terumbu karang konsisten berada di tahun 1998 dan 2016, hal ini mengindikasikan bahwa terjadinya fenomena El-Niño kuat dan fase IOD positif sangat berperan penting dalam menginisiasi *thermal stress* dan mengakibatkan kematian pada terumbu karang (Nagi et al., 2024; Napitupulu et al., 2025).



Gambar 3 Distribusi spasial pemutihan terumbu karang saat terjadinya *marine heatwaves* di wilayah perairan Indonesia menggunakan data durasi kumulatif MHWs.

Analisis Skor Risiko Pemutihan Terumbu karang di WPP RI

Analisis skor risiko pemutihan terumbu adalah sebuah cara yang digunakan untuk mengukur tingkatan atau seberapa besar kemungkinan suatu wilayah perairan mengalami kerusakan terumbu karang akibat terjadinya pemutihan pada karang yang nantinya dapat dimanfaatkan sebagai upaya mitigasi non-struktural. Dalam penelitian ini, skor risiko dihitung dengan mempertimbangkan data historis kejadian *marine heatwaves* selama 43 tahun. Semakin tinggi skor yang dihasilkan maka semakin besar pula risiko terumbu karang di suatu wilayah mengalami tekanan dan kehilangan kemampuan untuk melakukan simbiosis dengan alga *zooxanthellae* (Faiqoh et al., 2019). Berdasarkan visualisasi spasial yang ditampilkan pada Gambar 4, memperlihatkan bahwa saat terjadinya MHWs hampir seluruh WPP RI berisiko untuk mengalami pemutihan terumbu karang dengan skor rata-rata berada di atas 0.80.



Gambar 4 Distribusi spasial skor risiko pemutihan terumbu karang di 11 WPP RI.

Tabel 1 Pembagian skor risiko berdasarkan 11 WPP RI.

WPP	Rata-rata Skor Risiko	Kategori
718	0.91	Ekstrem
573	0.90	Sangat Berisiko
711	0.89	Sangat Berisiko
571	0.87	Sangat Berisiko
716	0.87	Sangat Berisiko
712	0.86	Sangat Berisiko
715	0.86	Sangat Berisiko
572	0.86	Sangat Berisiko
713	0.84	Sangat Berisiko
714	0.83	Sangat Berisiko
717	0.82	Sangat Berisiko

Secara rinci, Tabel 1 menunjukkan detail skor risiko pemutihan terumbu karang di 11 kawasan WPP RI. WPP 718 yang meliputi wilayah perairan laut Papua dan Laut Arafura memiliki skor risiko tertinggi terhadap degradasi terumbu karang akibat terjadinya MHWs dengan skor 0.91 dan termasuk dalam klasifikasi ekstrem. Diikuti oleh WPP 573 (perairan selatan Jawa, Bali, hingga Nusa Tenggara) dengan skor 0.90 yang termasuk kedalam klasifikasi sangat berisiko dan WPP 711, meliputi Laut Natuna dan perairan laut bagian utara Kalimantan dengan skor 0.89 dan termasuk dalam klasifikasi sangat

berisiko. WPP 571 (Samudera Hindia hingga barat Sumatera), WPP 716 (perairan laut Maluku), dan WPP 712 (Laut Jawa), WPP 715 (Selat Makassar dan Teluk Bone), dan WPP 572 (Samudera Hindia bagian selatan Jawa) secara berturut-turut memiliki skor risiko 0.87 dan 0.86 WPP 713 (Selat Flores dan Laut Sawu), WPP 714 (Laut Banda dan Laut Seram), serta WPP 717 (Laut Halmahera dan sekitarnya) secara berturut-turut memiliki skor risiko terjadinya pemutihan terumbu karang saat terjadinya MHWs dengan nilai 0.84, 0.83, dan 0.82 yang keseluruhan masih berada dalam kategori sangat berisiko.

SIMPULAN

Melalui hasil analisis spasial-temporal kejadian *marine heatwaves* (MHWs) selama 43 tahun serta hubungannya dengan distribusi terumbu karang di WPP Indonesia, diperoleh kesimpulan bahwa hampir seluruh wilayah perairan di Indonesia mengalami kejadian MHWs dan menyebabkan terjadinya degradasi pada terumbu karang. Berdasarkan analisis skor risiko pemutihan terumbu karang menggunakan data spasial jangka panjang kejadian MHWs diperoleh nilai rata-rata berada di atas 0.80, dengan wilayah yang mempunyai risiko tinggi terhadap kerusakan terumbu karang yaitu WPP 718 (0.91), WPP 573 (0.90), dan WPP 711 (0.89) yang termasuk kedalam kategori risiko ekstrem dan sangat berisiko. Skor tersebut diperoleh dari hasil integrasi tiga metrik utama (frekuensi kejadian, intensitas kumulatif, dan durasi kumulatif) yang dihitung berdasarkan pendekatan statistik nilai ambang batang persentil ke-90. Area terdampak pemutihan terumbu karang terbesar ditemukan di Sumbarsel, Wakatobi, dan Laut Jawa bagian utara secara berturut-turut. Penelitian ini memberikan penjelasan bahwa degradasi terumbu karang sangat berkaitan erat dengan adanya *thermal stress*. Maka dari itu, diperlukan upaya strategi adaptasi dan mitigasi yang tepat untuk menunjang keberlanjutan pengelolaan ekosistem laut di Indonesia di tengah ancaman pemanasan global akibat perubahan iklim yang bersifat dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Azuga, N. A., Galib, M., & Elizal. (2020). Analyzing the effect of Indian Ocean Dipole phenomenon to the anomalies distribution of sea surface temperature in West Sumatera. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 3(3), 260–270.
- Azuga, N. A., & Radjawane, I. M. (2022). Subsurface marine heatwaves of South Java Sea: Trend, frequency, duration, and cumulative intensity based on assimilation model (1993–2019). *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 27(3), 394–406.
- 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>
- Cahyani, W., Setyobudiandi, I., & Affandy, R. (2018). Kondisi dan status keberlanjutan ekosistem terumbu karang di kawasan konservasi perairan pulo pasi gusung, selayar. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(1), 153-166. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v10i1.21672>
- Carballo-Bolaños, R., Soto, D., & Chen, C. A. (2020). Thermal Stress and Resilience of Corals in a Climate-Changing World. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/jmse8010015>
- De Clippele, L. H., Díaz, L. A., Andradi-Brown, D. A., Lazarudi, M. E., Iqbal, M., Zainudin, I. M., Prabuning, D., van Hooidek, R., Hakim, A., Agung, F., Dermawan, A., & Hennige, S. J. (2023). Evaluating annual severe coral bleaching risk for marine protected areas across Indonesia. *Marine Policy*, 148, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105428>
- Dedi, D., Zamani, N., & Arifin, T. (2016). Hubungan parameter lingkungan terhadap gangguan kesehatan karang di Pulau Tunda — Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 11(2), 105. <https://doi.org/10.15578/jkn.v11i2.6112>
- Faiqoh, E., Karang, I. W. G. A., & Wiyanto, D. B. (2019). Dampak pemutihan karang keras pada komunitas ikan karang dan makrozoobenthos di wilayah perairan tejakula, buleleng, bali. *Rekayasa*, 12(1), 24. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v12i1.5290>
- Farid, M., Purnomo, P., & Supriharyono, S. (2018). Perubahan tutupan terumbu karang ditinjau dari banyaknya wisatawan di tanjung gelam kepulauan karimun jawa menggunakan citra satelit landsat 8 oli. *Management of Aquatic Resources Journal (Maquares)*, 7(1), 18-27. <https://doi.org/10.14710/marj.v7i1.22521>

- Firihu, M., Variiani, V., Nurjannah, I., & Takwir, A. (2022). Rehabilitasi ekosistem terumbu karang menggunakan metode rangka spider-web. *jpm*, 1(1), 47-55. <https://doi.org/10.56742/jpm.v1i1.15>
- 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., Oliver, E., Gupta, A., Benthuyssen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N., Moore, P., Thomsen, M., Wernberg, T., dan Smale, D. (2018): Categorizing and Naming Marine Heatwaves, *Oceanography*, 31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D., Straub, S., Oliver, E. C. J., Benthuyssen, 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/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Hooidonk, R. v., Maynard, J., Tamelander, J., Gove, J. M., Ahmadia, G. N., Raymundo, L. J., ... & Planes, S. (2016). Local-scale projections of coral reef futures and implications of the paris agreement. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep39666>
- Hu, S., Li, S., Zhang, Y., Guan, C., Du, Y., Feng, M., Ando, K., Wang, F., Schiller, A., & Hu, D. (2021). Observed strong subsurface marine heatwaves in the tropical western Pacific Ocean. *IOP Conference Series: Environmental Research Letters*, 16(10), 104024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac26f2>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S., dan Torda, G. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages, *Nature*, 556, 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- 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>
- Ismail, M. F. A. (2021). Characteristics of marine heatwaves off West Sumatra derived from high-resolution satellite data. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 48(6), 130–136. <http://jonuns.com/index.php/journal/article/view/597>
- Kimura, T., Tun, K., & Chou, L. M. (Eds.). (2018). Status of coral reefs in East Asian Seas Region: 2018. Ministry of the Environment of Japan & Japan Wildlife Research Center.
- Li, X., Donner, S., & Martell, H. (2024). The loss of beneficial thermal priming on global coral reefs. *Global Change Biology*, 30(12). <https://doi.org/10.1111/gcb.17592>
- Liu, Q.-Y., Feng, M., Wang, D., dan Wijffels, S. (2015): Interannual variability of the Indonesian Throughflow transport: A revisit based on 30 year expendable bathythermograph data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 8270–8282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JC011351>
- Manta, G., Mello, S., Trinchin, R., Badagian, J., & Barreiro, M. (2018). The 2017 record marine heatwave in the southwestern atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 45(22). <https://doi.org/10.1029/2018gl081070>
- Mason, R. A. B., Bozec, Y.-M., & Mumby, P. J. (2025). Coral bleaching and mortality overestimated in projections based on Degree Heating Months. *Nature Geoscience*, 18, 120–123. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-00567-w>
- McGowan, H., & Theobald, A. (2017). ENSO weather and coral bleaching on the Great Barrier Reef, Australia. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 10,601–10,607. <https://doi.org/10.1002/2017GL074877>
- Nadimpalli, J. R., Sanikommu, S., Subramanian, A. C., Giglio, D., & Hoteit, I. (2025). Subsurface marine heat waves and coral bleaching in the southern Red Sea linked to remote forcing. *Weather and Climate Extremes*, 48, 100771. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2025.100771>
- Nagi, A., Nurdjaman, S., Radjawanne, I. M., Napitupulu, G., Habibullah, A. D., & Park, H. (2024). Effect of marine heat waves for coral bleaching in Lombok Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1350, 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012037>
- Napitupulu, G., Nagi, A., Nurdjaman, S., Radjawane, I. M., Rachmayani, R., Ramadhan, M. R., Nasution, M. I., Habibullah, A. D., & Kelvin, F. M. (2025). Impact of marine heatwaves and cold spells on coral reef ecosystem in a tropical region: A case study of Lombok Waters, Indonesia. *Marine Systems & Ocean Technology*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s40868-024-00160-x>

- Rosic, N., Rémond, C., & Mello-Athayde, M. A. (2020). Differential impact of heat stress on reef-building corals under different light conditions. *Marine Environmental Research*, 158, 104947. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104947>
- Simarangkir, O., Yulianda, F., & Boer, M. (2015). Community recovery of hard coral post bleaching event in amed bali. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(2), 158-163. <https://doi.org/10.18343/jipi.20.2.158>
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Koch-Larrouy, A., Lee, T., Potemra, J. T., Pujiana, K., & Wijffels, S. (2014). The Indonesian seas and their role in the coupled ocean–climate system. *Nature Geoscience*, 7(7), 487–492. <https://doi.org/10.1038/ngeo2188>
- Sully, S., Burkepile, D. E., Donovan, M. K., Hodgson, G., & van Woesik, R. (2019). A global analysis of coral bleaching over the past two decades. *Nature Communications*, 10, 1264. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09238-2>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Balmaseda, M. A. (2014). Earth's Energy Imbalance. *Journal of Climate*, 27(9), 3129-3144. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00294.1>
- Yao, Y., & Wang, C. (2024). Subsurface marine heatwaves in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(10), e2024JC021356. <https://doi.org/10.1029/2024JC021356>