

Analisis Prioritas Rehabilitasi Terumbu Karang Berbasis SST dan *Coral Bleaching* di Pulau Liwungan, Pandeglang, Banten

Muhammad Romdonul Hakim^{1*}, Muhammad Yusuf¹, Rizqi Rizaldi Hidayat², Nur Ikhsan³

¹Program Studi Teknik Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang, Indonesia

²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia

³Program Studi Ekowisata Bahari, Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan Wakatobi, Indonesia

*Email Koresponden: anugerah.hakim@gmail.com

Diterima: 29-05-2026

Disetujui: 11-06-2026

Publish: 20-06-2026

Abstrak Ekosistem terumbu karang rentan terhadap peningkatan suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature/SST*) yang dapat memicu pemutihan karang (*coral bleaching*). Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika SST, hubungan antara SST dan kondisi terumbu karang, serta menentukan prioritas rehabilitasi terumbu karang di Pulau Liwungan menggunakan citra Landsat 8 dan 9 periode April 2023–2025 yang diolah melalui *Google Earth Engine* (GEE). Prioritas rehabilitasi ditentukan melalui analisis spasial berbasis piksel dengan sistem skoring akumulatif yang mengintegrasikan intensitas stres termal (*Degree Heating Weeks/DHW*) dan perubahan luasan karang sehat. Hasil menunjukkan tren penurunan SST selama periode pengamatan yang diikuti oleh penurunan risiko bleaching dan peningkatan luasan karang sehat pada 2024–2025. Analisis regresi linear menunjukkan hubungan yang kuat antara SST dan luasan karang sehat ($R^2 = 0,7847$), mengindikasikan bahwa SST merupakan faktor utama yang memengaruhi kondisi terumbu karang. Integrasi parameter stres termal dan perubahan tutupan karang berhasil mengidentifikasi tiga kategori prioritas rehabilitasi, yaitu Mendesak seluas 3,97 ha, Waspada seluas 167,89 ha, dan Tidak Ada Tindakan seluas 10,53 ha. Studi ini menawarkan pendekatan spasial yang mengintegrasikan dinamika SST dan risiko bleaching untuk mendukung penentuan prioritas rehabilitasi terumbu karang secara lebih adaptif. Temuan ini menunjukkan bahwa penginderaan jauh berbasis GEE efektif sebagai alat pendukung pengelolaan pesisir berbasis bukti, meskipun validasi lapangan masih diperlukan untuk meningkatkan keandalan hasil.

Kata kunci: SST; Pemutihan Karang; Pulau Liwungan; Landsat; *Google Earth Engine*

Abstract Coral reef ecosystems are highly vulnerable to increases in Sea Surface Temperature (SST), which can trigger coral bleaching events. This study aimed to analyze SST dynamics, examine the relationship between SST and coral reef conditions, and identify rehabilitation priorities in Liwungan Island using Landsat 8 and 9 imagery acquired between April 2023 and 2025 and processed through Google Earth Engine (GEE). Rehabilitation priorities were determined using a pixel-based spatial analysis with a cumulative scoring system integrating thermal stress intensity, represented by Degree Heating Weeks (DHW), and changes in healthy coral cover. The results revealed a decreasing SST trend during the observation period, accompanied by a reduction in bleaching risk and an increase in healthy coral cover in 2024–2025. Linear regression analysis demonstrated a strong relationship between SST and healthy coral cover ($R^2 = 0.7847$), indicating that SST is a major driver of coral reef condition. The integration of thermal stress and coral cover change successfully identified three rehabilitation priority classes: Urgent (3.97 ha), Alert (167.89 ha), and No Action Required (10.53 ha). This study provides a spatially explicit framework that integrates SST dynamics and bleaching risk to support adaptive coral reef rehabilitation planning. The findings demonstrate the potential of GEE-based remote sensing for evidence-based coastal management, although field validation remains necessary to improve result reliability.

Keywords: SST; Coral Bleaching; Liwungan Island; Landsat; *Google Earth Engine*

1. PENDAHULUAN

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran penting sebagai habitat bagi berbagai biota laut, pelindung alami pantai dari abrasi, serta penyedia sumber daya ekonomi melalui sektor perikanan dan pariwisata bahari. Secara global maupun nasional, ekosistem ini memberikan manfaat ekologis dan ekonomis yang signifikan sehingga keberlanjutannya menjadi sangat penting bagi kesejahteraan masyarakat pesisir (Mazaya et al., 2019; Mira et al., 2017). Namun demikian, terumbu karang merupakan ekosistem yang sangat rentan terhadap perubahan lingkungan, khususnya terhadap peningkatan suhu permukaan laut (SST).

Peningkatan SST merupakan salah satu dampak utama perubahan iklim global yang dapat memicu fenomena *coral bleaching*. Fenomena ini terjadi akibat stres termal yang menyebabkan karang kehilangan simbiosis dengan *zooxanthellae* sehingga berpotensi menurunkan fungsi ekosistem hingga menyebabkan kematian karang apabila berlangsung dalam jangka waktu lama (Ampou et al., 2020; Hughes et al., 2020).

Meskipun dipahami bahwa kesehatan terumbu karang juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan lokal lainnya seperti sedimentasi, kualitas air, dan arus laut (Afifah et al., 2025; Dedi et al., 2016), pemantauan dinamika SST tetap menjadi indikator krusial karena sifatnya sebagai pendorong utama pemutihan karang yang dapat dipantau secara efisien dan berkelanjutan melalui teknologi penginderaan jauh (Obura et al., 2019; Vardi et al., 2021).

Pulau Liwungan yang terletak di Kabupaten Pandeglang, Banten, merupakan kawasan wisata bahari yang memiliki nilai ekonomi tinggi namun sangat rentan terhadap tekanan lingkungan (Febriana et al., 2022). Kondisi aktual di lapangan menunjukkan bahwa ekosistem terumbu karang di wilayah ini telah mengalami tekanan hebat, salah satunya akibat dampak tsunami Selat Sunda pada tahun 2018 yang merusak struktur fisik karang dan menurunkan hasil tangkapan nelayan (LAZ Harfa, 2023). Meskipun upaya rehabilitasi seperti transplantasi karang telah dilakukan di beberapa titik, tantangan berupa fluktuasi suhu ekstrem tetap mengancam keberhasilan pemulihan ekosistem tersebut. Hal ini menunjukkan perlunya sistem pemantauan berbasis data spasial yang dapat memberikan informasi cepat mengenai kondisi termal dan status pemutihan karang di lokasi tersebut.

Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan parameter SST untuk memantau *coral bleaching* melalui *platform* komputasi awan seperti GEE (Gorelick et al., 2017; Skirving et al., 2020). Namun, sebagian besar studi masih bersifat deskriptif dalam menjelaskan hubungan antara suhu dan kondisi karang (Sully et al., 2019), atau berfokus pada pengembangan algoritma ekstraksi data satelit semata (Wu et al., 2022). Masih terdapat celah penelitian yang signifikan dalam mengintegrasikan dinamika SST dan status *bleaching* secara multi-temporal untuk menentukan prioritas tindakan rehabilitasi yang aplikatif pada skala lokal, khususnya di kawasan terdampak pasca-bencana seperti Pulau Liwungan. Integrasi ini penting untuk memastikan bahwa upaya rehabilitasi dilakukan pada lokasi yang secara termal mendukung pertumbuhan karang.

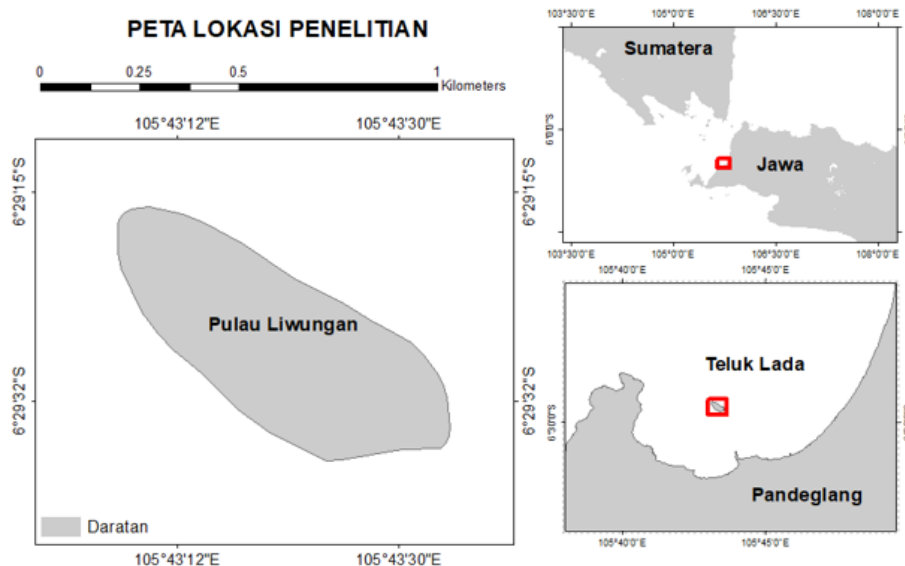
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan data multi-temporal citra Landsat melalui GEE untuk menganalisis dinamika SST dan status *coral bleaching* di Pulau Liwungan. Kebaruan penelitian ini terletak pada secara inovatif mengintegrasikan kedua parameter tersebut sebagai dasar utama dalam penyusunan peta prioritas tindakan rehabilitasi spasial, menawarkan pendekatan adaptif yang krusial untuk pengelolaan ekosistem terumbu karang di wilayah terdampak pasca-bencana seperti Pulau Liwungan. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah bagi pengelolaan kawasan wisata bahari yang lebih adaptif tanpa mengabaikan kompleksitas lingkungan yang ada. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memetakan dinamika SST pada terumbu karang di Pulau Liwungan, menganalisis keterkaitannya dengan perubahan status *coral bleaching*, serta menentukan prioritas tindakan rehabilitasi sebagai dasar pengelolaan ekosistem terumbu karang yang berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif inferensial berbasis penginderaan jauh (*remote sensing*) untuk mengkaji dinamika SST, perubahan status risiko *coral bleaching*, serta penentuan prioritas tindakan rehabilitasi terumbu karang. Analisis diintegrasikan melalui *platform* GEE untuk pengolahan data spasio-temporal, yang kemudian diperkuat dengan analisis statistik regresi untuk menguji signifikansi hubungan antara fluktuasi SST dan luasan risiko *coral bleaching*. Pendekatan ini dipilih karena mampu menyajikan korelasi antara parameter lingkungan makro dengan kondisi kesehatan ekosistem secara presisi dan berkelanjutan.

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari–Maret 2026 di Laboratorium Komputer, Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang. Lokasi kajian berada pada ekosistem terumbu karang di Pulau Liwungan, Kabupaten Pandeglang, Banten (Gambar 1). Area penelitian (*Area of Interest/AOI*) dibatasi berdasarkan poligon terumbu karang dengan koordinat 6°28'57,38"–6°30'21,46" LS dan 105°42'0,37"–105°45'1,74" BT.



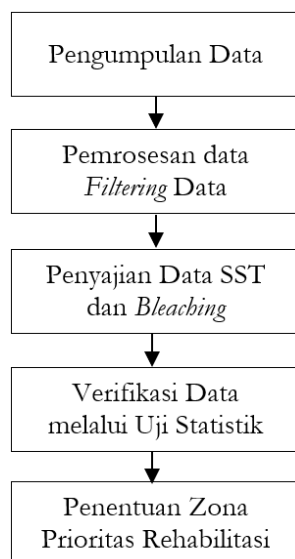
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2. Teknik Pengumpulan Data

Data utama yang digunakan adalah citra satelit Landsat 8 (LC08) dan Landsat 9 (LC09) *Level 2* (*Collection 2 Tier 1*) yang diperoleh melalui *platform* GEE. Parameter yang diekstraksi meliputi *Surface Temperature* (ST) dan *Quality Assessment* (QA). Analisis dilakukan secara multi-temporal pada bulan April (2023–2025) untuk meminimalisasi bias variabilitas musiman dan memanfaatkan ketersediaan citra dengan tutupan awan minimal (*cloud-free*). Sebagai data pendukung untuk identifikasi habitat bentik karang, digunakan data dari *Allen Coral Atlas* (ACA) dengan resolusi spasial 5 meter.

2.3. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif dengan mengombinasikan analisis deskriptif untuk pemetaan spasial dan analisis inferensial melalui uji regresi linear untuk membuktikan hubungan antar variabel. Tahapan sistematis penelitian ini, mulai dari akuisisi data hingga dihasilkan peta prioritas rehabilitasi, ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Tahapan Penelitian

Secara prosedural, data citra Landsat yang telah terakuisisi melalui *platform* GEE diproses untuk mengekstraksi nilai SST. Nilai SST dihitung dari band termal ST_B10 (*Surface Temperature*) menggunakan faktor skala melalui persamaan (1):

$$SST = DN \times 0,00341802 + 149,0 - 273,15 \dots\dots\dots (1)$$

Dimana DN atau *Digital Number* adalah nilai piksel pada band ST_B10. Setelah didapatkan nilai SST, dilakukan pemfilteran data (*filtering*) dengan mengeliminasi piksel di bawah 25°C yang diidentifikasi sebagai *noise* akibat kontaminasi atmosferik atau *mixed pixel* di garis pantai (Speiser & Largier, 2024). Data kemudian diproses menggunakan fungsi komposit median untuk menghasilkan representasi nilai SST bulanan yang stabil.

Penentuan status risiko *coral bleaching* dilakukan dengan mengadopsi konsep *Degree Heating Weeks* (DHW) dari NOAA *Coral Reef Watch*. DHW dihitung berdasarkan akumulasi stres termal (SST di atas ambang batas lokal) selama periode pengamatan. Klasifikasi tingkat risiko dibagi menjadi empat kategori operasional (Tabel 1).

Tabel 1. Status Risiko *Coral Bleaching* Berdasarkan Nilai DHW

Nilai DHW (°C/minggu)	Status Risiko <i>Bleaching</i>	Dampak Ekologis
≤ 1.0	Tidak Stress	Kondisi normal, tidak ada indikasi pemutihan
> 1.0–4.0	Ringan	Karang mulai mengalami stres termal, potensi pemutihan rendah
> 4.0–8.0	Sedang	Pemutihan karang yang signifikan sangat mungkin terjadi
> 8.0	Berat	Pemutihan parah dan mortalitas karang sangat mungkin terjadi

Sumber: Modifikasi dari NOAA, 2020

Analisis statistik menggunakan Uji Regresi Linear Sederhana dilakukan untuk menguji signifikansi hubungan antara dinamika SST dan kondisi kesehatan terumbu karang. Dalam model ini, nilai rata-rata SST bulanan ditetapkan sebagai variabel independen (X), sedangkan luasan area terumbu karang yang berisiko *coral bleaching* ditetapkan sebagai variabel dependen (Y). Kekuatan hubungan antar variabel diukur melalui Koefisien Korelasi (R), sementara kontribusi variabel SST dalam mempengaruhi variasi luasan *coral bleaching* dihitung berdasarkan Koefisien Determinasi (R²). Seluruh pengolahan data statistik dilakukan untuk memberikan landasan ilmiah dalam memvalidasi apakah fluktuasi suhu permukaan laut merupakan pendorong utama perubahan kondisi terumbu karang di lokasi penelitian.

Penentuan prioritas tindakan rehabilitasi dilakukan melalui analisis spasial berbasis piksel dengan sistem skoring akumulatif. Intensitas *coral bleaching* selama bulan April (2023–2025) dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai indeks prioritas tunggal. Pendekatan ini dipilih untuk memberikan gambaran cepat (*rapid assessment*) pada skala spasial yang luas di mana survei lapangan secara berkala sulit dilakukan karena keterbatasan logistik. Hasil perhitungan kemudian diklasifikasikan menjadi empat tingkat tindakan prioritas (Tabel 2).

Tabel 2. Tingkat Prioritas Tindakan Rehabilitasi Terumbu Karang

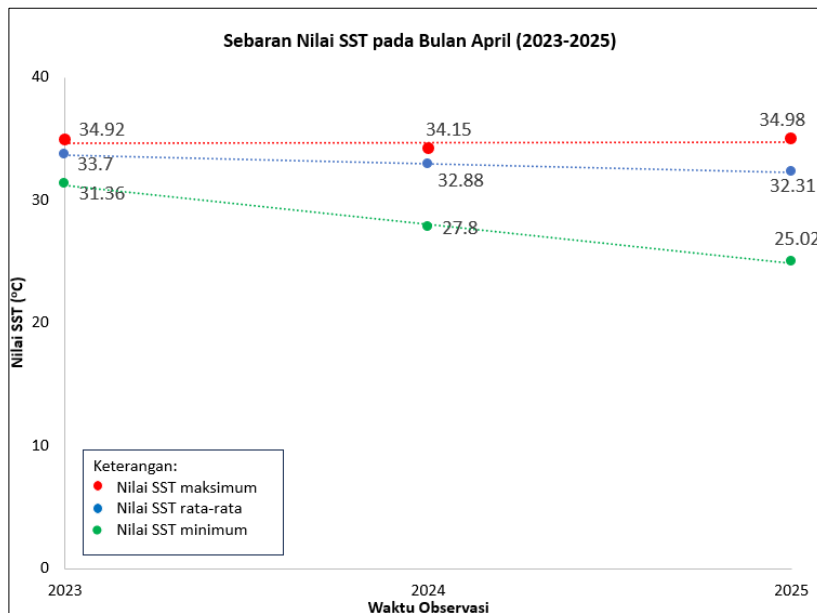
Nilai Prioritas	Tingkat Prioritas	Rekomendasi
1	Tidak ada Tindakan	Pemeliharaan alami melalui perlindungan habitat secara umum
2	Waspada	Pengendalian aktivitas lokal melalui sosialisasi mengurangi tekanan lingkungan
3	Mendesak	Mitigasi aktif melalui pembatasan aktivitas manusia dan rehabilitasi ringan
4	Sangat Mendesak	Intervensi intensif melalui proteksi penuh dari aktivitas manusia dan restorasi aktif

Penelitian ini difokuskan pada pengembangan model penilaian risiko spasial menggunakan data penginderaan jauh multi-temporal. Ketiadaan data validasi lapangan (*in-situ*) diakui sebagai keterbatasan utama dalam penelitian ini sehingga akurasi absolut dari peta sebaran *coral bleaching* tidak dapat dievaluasi secara langsung. Namun, penggunaan algoritma yang telah terstandarisasi secara global (NOAA DHW) dan prosedur koreksi data yang ketat dilakukan untuk menjaga konsistensi hasil. Oleh karena itu, *output* penelitian ini diposisikan sebagai model prediktif yang divalidasi melalui uji statistik regresi untuk mengidentifikasi area yang secara teoritis memiliki kerentanan termal tinggi. Hal ini diharapkan dapat menjadi panduan awal bagi upaya pengelolaan sebelum survei lapangan yang lebih intensif dilakukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

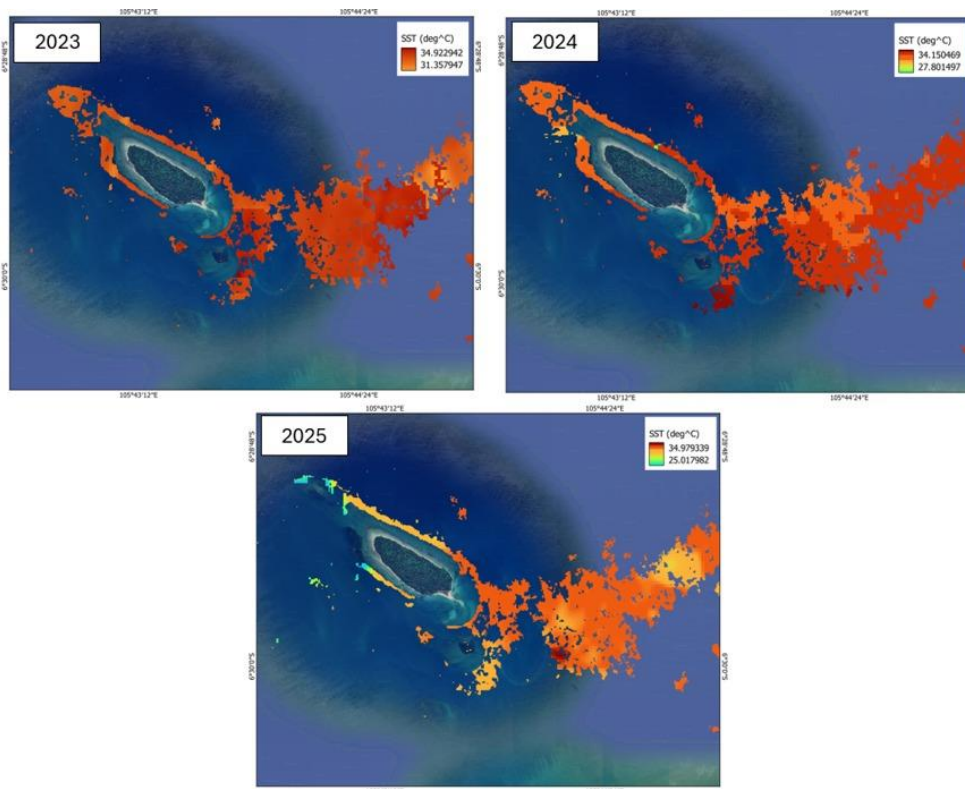
3.1. Dinamika *Sea Surface Temperatur* (SST)

Hasil pengolahan citra Landsat 8 dan Landsat 9 menunjukkan bahwa SST di perairan Pulau Liwungan pada bulan April periode 2023–2025 mengalami fluktuasi dengan kecenderungan menurun (Gambar 3).



Gambar 3. Grafik Nilai SST di Pesisir Perairan Pulau Liwungan

Gambar 3 menunjukkan hasil pengamatan nilai SST rata-rata pada April 2023 tercatat sebesar 33,70°C, kemudian menurun menjadi 32,53°C pada tahun 2024, dan kembali menurun menjadi 32,31°C pada tahun 2025. Selain itu, nilai SST minimum juga menunjukkan tren penurunan dari tahun 2023 (31,36°C) hingga 2025 (21,10°C), sedangkan nilai maksimum mengalami fluktuasi dengan nilai tertinggi terjadi pada tahun 2025 (34,98°C). Pola ini mengindikasikan adanya perubahan kondisi termal yang cukup signifikan selama periode pengamatan. Hal ini sejalan dengan penelitian Tan et al. (2025) dan Wulansari et al. (2025) yang menyatakan bahwa wilayah perairan utara dan selatan Jawa pada tahun 2023 terjadi fenomena *El Niño*. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu udara dan kemarau yang lebih panjang/ekstrem sehingga nilai SST pada wilayah tersebut cenderung tinggi. Sebaliknya, pada tahun 2025 kondisi ENSO cenderung netral dengan *La Niña* lemah hingga awal tahun, sehingga curah hujan cenderung lebih tinggi dan suhu ekstrem panas berkurang dibanding 2023 (BMKG, 2025).

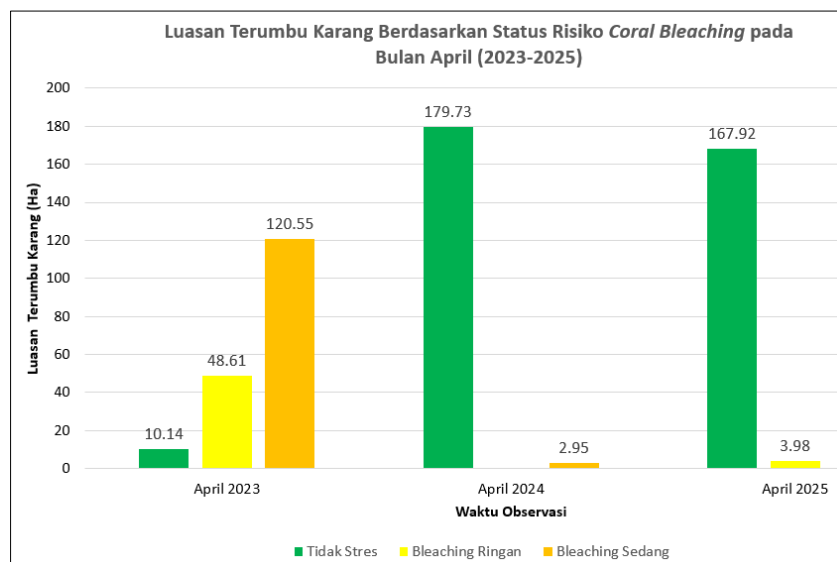


Gambar 4. Sebaran Spasial Nilai SST di Pulau Liwungan

Distribusi SST secara spasial menunjukkan bahwa pada tahun 2023 sebagian besar wilayah perairan didominasi suhu relatif tinggi (Gambar 4). Namun, sebaran nilai SST kemudian berangsur menurun pada tahun 2024 dan 2025, terutama pada bagian barat dan barat laut Pulau Liwungan yang mencatatkan suhu terendah hingga 25,02°C. Sementara itu, perairan di bagian timur Pulau Liwungan tetap memiliki nilai gradien SST yang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan di bagian sisi lainnya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Wisna et al. (2015), hal ini dikaitkan dengan geomorfologi perairan yang lebih terlindung dari sirkulasi massa air utama Selat Sunda sehingga terjadi akumulasi panas (*heat entrapment*). Sebaliknya, sisi barat pulau yang berhadapan langsung dengan jalur utama massa air Arlindo (Arus Lintas Indonesia) dan pengaruh massa air Samudera Hindia cenderung memiliki sirkulasi yang lebih baik, yang secara alami membantu memitigasi kenaikan suhu ekstrem melalui proses pengadukan (*mixing*) vertikal akibat arus pasang surut yang kuat di Selat Sunda

3.2. Perubahan Status Risiko *Coral Bleaching*

Pada April 2023, kondisi terumbu karang didominasi oleh kategori risiko *bleaching* sedang, dengan luasan mencapai 120,55 hektar, sementara luasan karang yang tidak mengalami stres hanya sebesar 10,14 hektar (5,66%) dari total luasan 179,30 hektar. Namun, pada tahun 2024 dan 2025 terjadi perubahan yang signifikan, di mana kondisi terumbu karang tidak mengalami risiko *bleaching* menjadi dominan dengan luasan masing-masing sebesar 179,73 hektar dan 167,92 hektar (Gambar 5). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kondisi kesehatan terumbu karang dalam periode tersebut.

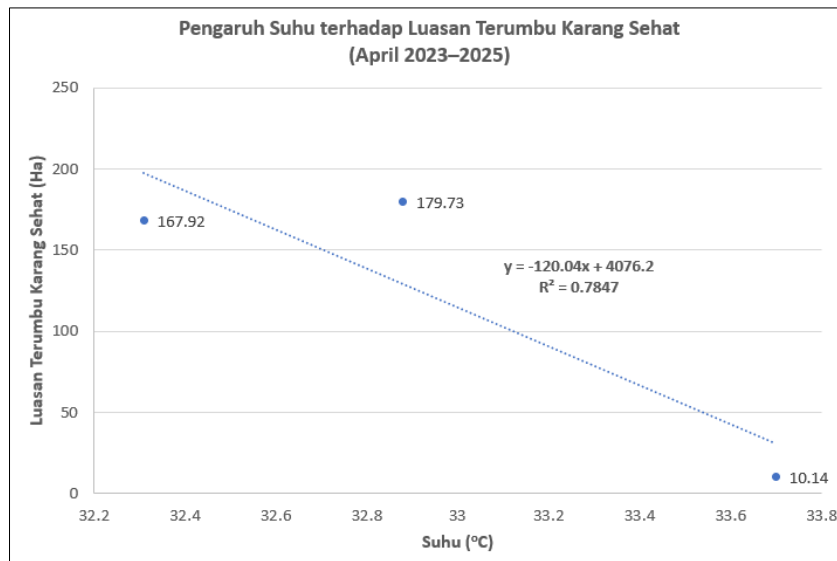


Gambar 5. Grafik Luasan Status Risiko *Coral Bleaching* di Pesisir Perairan Pulau Liwungan

Peningkatan luasan karang sehat ini berkaitan erat dengan penurunan SST yang terjadi pada periode yang sama (Gambar 6). Hasil regresi linear menunjukkan adanya hubungan korelasi yang negatif antara luasan karang sehat dengan nilai SST dimana semakin tinggi nilai SST maka luasan terumbu karang sehat semakin menurun. Koefisien korelasi (R) sebesar 0,8858 menunjukkan adanya hubungan linear yang sangat kuat antara peningkatan luasan karang sehat dengan penurunan nilai SST. Koefisien determinasi (R^2) menunjukkan nilai sebesar 78,47% sehingga variasi naik-turunnya luasan terumbu karang sehat dipengaruhi langsung oleh perubahan nilai SST. Sementara itu, sisanya sebesar 21,53% dapat dipengaruhi oleh faktor kondisi oseanografi lokal lainnya seperti arus, pasang surut maupun pengaruh massa air di Selat Sunda. Secara ekologis, penurunan suhu laut akan mengurangi stres fisiologis pada karang sehingga memungkinkan karang untuk kembali membentuk simbiosis dengan zooxanthellae. Hal ini sesuai dengan Hughes et al. (2020) yang menyatakan bahwa pemulihan terumbu karang sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu yang kembali berada dalam ambang toleransi.

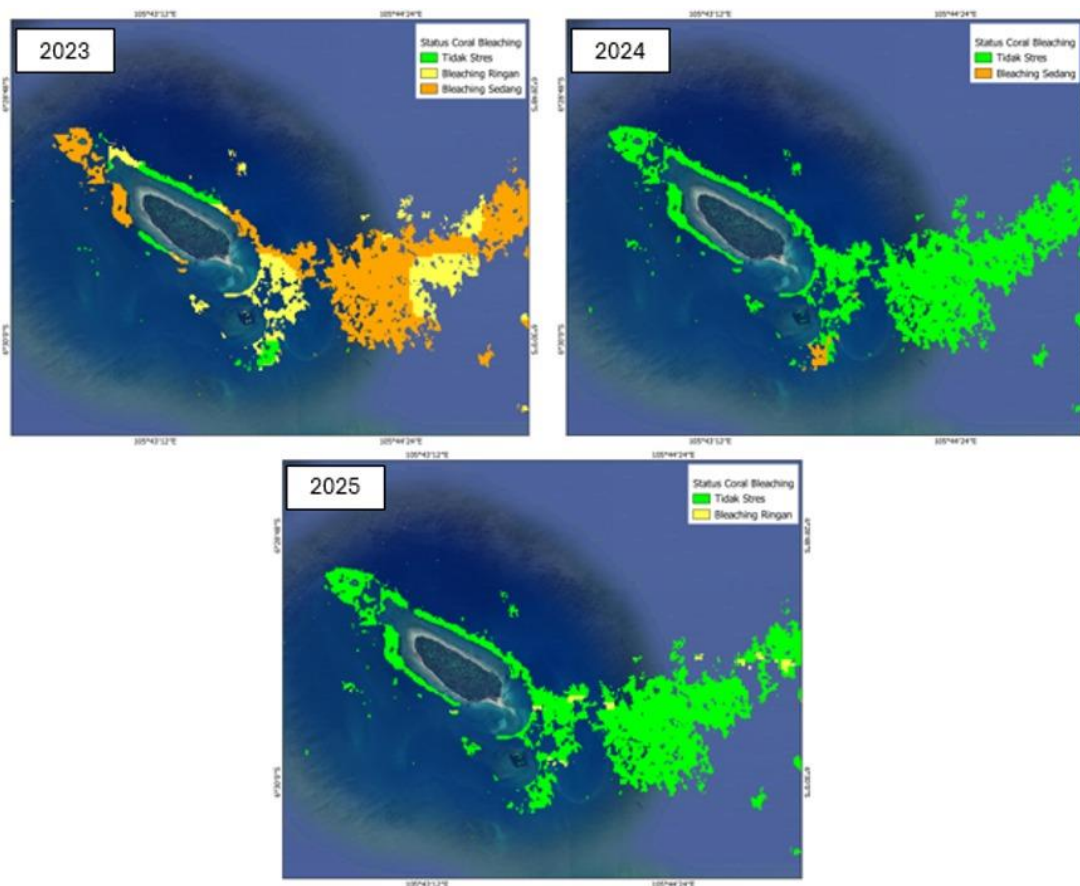
Fenomena pemulihan karang pasca-tekanan termal di Pulau Liwungan ini sejalan dengan pola yang ditemukan di wilayah tropis lainnya. Sebagai contoh, studi oleh Razak et al. (2025) di Kepulauan Seribu, Jakarta, juga mencatat adanya pemulihan karang (*recovery*) yang cukup responsif setelah meredanya stres termal akibat *El Niño* 2023–2024. Hal ini membuktikan bahwa terumbu karang di perairan dangkal

Indonesia, meskipun berada dekat dengan wilayah terdampak aktivitas manusia atau pasca-bencana, masih memiliki resiliensi alami yang tinggi jika fluktuasi suhu ekstrem segera kembali ke kondisi normal.



Gambar 6. Grafik Regresi Linear Pengaruh Suhu terhadap Luasan Terumbu Karang Sehat di Pulau Liwungan

Secara spasial (Gambar 7), pada tahun 2023 distribusi risiko *bleaching* terkonsentrasi pada sisi timur-tenggara pulau, sedangkan pada tahun 2024–2025 sebaran karang sehat menjadi lebih merata di seluruh wilayah perairan. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah yang sebelumnya mengalami tekanan termal tinggi memiliki kecenderungan untuk pulih setelah kondisi suhu menurun.

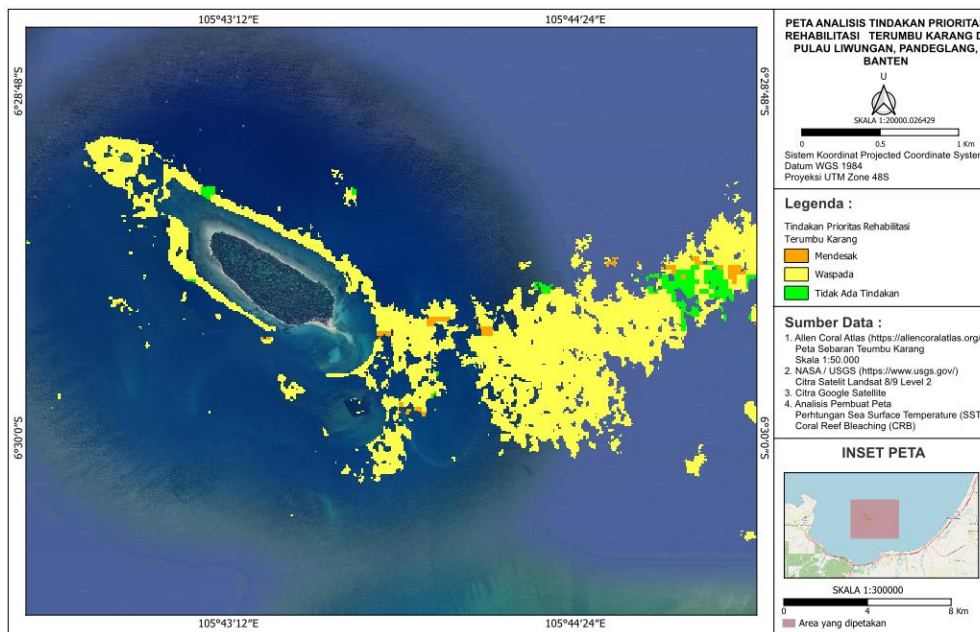


Gambar 7. Sebaran Spasial Luasan Status Risiko *Coral Bleaching* di Pulau Liwungan

Dengan demikian, hasil ini menguatkan bahwa SST merupakan faktor pengendali utama dalam dinamika *coral bleaching*. Meskipun demikian, fluktuasi suhu maksimum yang masih terjadi menunjukkan bahwa potensi stres termal tetap ada, sehingga pemantauan berkelanjutan tetap diperlukan untuk mengantisipasi kejadian *bleaching* di masa mendatang (Obura et al., 2019; Vardi et al., 2021).

3.3. Analisis Prioritas Tindakan Rehabilitasi

Integrasi antara perubahan nilai SST (Δ SST) dan status risiko *bleaching* selama tahun 2023–2025 menghasilkan peta prioritas tindakan rehabilitasi yang membagi wilayah menjadi tiga zona (Gambar 8).



Gambar 8. Peta Analisis Tindakan Prioritas Rehabilitasi Terumbu Karang di Pulau Liwungan

Zona prioritas rehabilitasi kategori Mendesak memiliki luasan sebesar 3,97 ha (2,18%) dan terkonsentrasi pada area yang mengalami paparan panas tinggi dengan sirkulasi perairan relatif rendah, terutama di sisi timur Pulau Liwungan. Kondisi ini menunjukkan tingkat tekanan termal yang tinggi sehingga kemampuan pemulihan alami terumbu karang menjadi lebih terbatas. Upaya rehabilitasi aktif diperlukan melalui transplantasi spesies karang yang toleran terhadap suhu tinggi (*heat-tolerant species*) serta pemasangan struktur pemecah gelombang rendah untuk meningkatkan aerasi perairan dan mendukung keberhasilan penempelan larva karang (Ferrario et al., 2014; Goreau & Hilbertz, 2005).

Zona kategori Waspada mencakup area terluas, yaitu 167,89 ha (92,05%), yang menunjukkan bahwa sebagian besar ekosistem terumbu karang masih berada dalam kondisi yang memerlukan pengawasan untuk mencegah terjadinya degradasi lebih lanjut. Pengelolaan pada zona ini diarahkan pada pemantauan berkala terhadap tingkat rekrutmen alami karang, pembatasan aktivitas wisata yang berpotensi merusak habitat, khususnya penggunaan jangkar kapal, serta pengendalian sumber pencemaran antropogenik yang dapat meningkatkan tekanan lingkungan terhadap karang yang sedang mengalami proses pemulihan (Hughes et al., 2023). Sementara itu, zona kategori Tidak Ada Tindakan seluas 10,53 ha (5,77%) menunjukkan kondisi termal yang relatif stabil dengan tingkat risiko yang rendah. Area ini lebih tepat dikelola melalui pendekatan konservasi pasif, seperti penerapan kawasan larang ambil dan perlindungan habitat, sehingga proses pemulihan alami dapat berlangsung tanpa intervensi fisik yang berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem (Smallhorn-west et al., 2022).

Integrasi data SST, risiko coral bleaching, dan perubahan luasan karang sehat menghasilkan peta prioritas rehabilitasi yang mampu mengidentifikasi tingkat kerentanan terumbu karang secara spasial sekaligus memberikan arahan pengelolaan yang sesuai dengan kondisi setiap zona. Meskipun demikian, estimasi SST menggunakan citra Landsat di wilayah perairan dangkal masih menghadapi keterbatasan akibat efek mixed pixel, yaitu tercampurnya sinyal termal antara badan air, daratan, dan substrat dasar perairan. Potensi ketidakpastian tersebut telah diminimalkan melalui proses koreksi data dan penyaringan piksel yang teridentifikasi sebagai noise. Namun, peningkatan akurasi model tetap memerlukan validasi

lapangan serta pemanfaatan sensor dengan resolusi spasial dan radiometrik yang lebih tinggi pada penelitian selanjutnya, terutama untuk mendukung pemetaan rehabilitasi pada skala yang lebih rinci.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis dinamika SST dan status risiko *coral bleaching* di perairan Pulau Liwungan, Pandeglang, Banten, selama periode April 2023–2025 menggunakan data citra Landsat 8 dan 9 yang diolah melalui GEE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SST di wilayah studi mengalami fluktuasi dengan kecenderungan menurun dari tahun 2023 hingga 2025. Dinamika SST ini memiliki pengaruh signifikan terhadap kondisi ekosistem terumbu karang, yang terbukti dengan berkurangnya tingkat risiko *coral bleaching* dan meningkatnya luasan terumbu karang sehat pada tahun 2024 dan 2025. Analisis regresi linear mengkonfirmasi hubungan yang kuat antara penurunan SST dan peningkatan luasan terumbu karang sehat, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 78,47%. Hal ini menegaskan bahwa fluktuasi SST merupakan salah satu faktor pendorong utama yang mengendalikan dinamika kesehatan terumbu karang di Pulau Liwungan, meskipun 21,53% variasi lainnya dapat dipengaruhi oleh kondisi oseanografi lokal seperti sedimentasi, arus, dan kualitas air.

Integrasi parameter SST dan status risiko *coral bleaching* juga terbukti efektif dalam mengidentifikasi zona prioritas tindakan rehabilitasi secara spasial. Tiga kategori prioritas berhasil dipetakan: zona Mendesak (3,97 hektar atau 2,18%) yang memerlukan intervensi intensif, zona Waspada (167,89 hektar atau 92,05%) yang membutuhkan pemantauan rutin dan pengendalian tekanan lokal, serta zona Tidak Ada Tindakan (10,53 hektar atau 5,77%) yang direkomendasikan untuk perlindungan alami. Pendekatan berbasis penginderaan jauh ini memberikan landasan ilmiah yang cepat dan efisien untuk pengelolaan kawasan pesisir yang adaptif.

Secara lebih luas, temuan ini memberikan bukti empiris mengenai ketangguhan (*resilience*) ekosistem terumbu karang dalam menghadapi anomali termal ekstrem seperti El Niño 2023. Hal ini memperkuat teori bahwa penurunan SST ke ambang batas toleransi dapat memicu pemulihan biologis yang signifikan secara cepat, asalkan tekanan lingkungan lainnya terkendali. Dari sudut metodologis, integrasi analisis spasial berbasis piksel melalui GEE dalam studi ini menawarkan kerangka kerja yang efisien untuk pemantauan kesehatan pesisir di wilayah dengan keterbatasan data lapangan. Model skoring akumulatif yang dikembangkan bersifat adaptif dan dapat direplikasi di wilayah pesisir lain untuk menghasilkan peta prioritas rehabilitasi yang presisi, membantu pemangku kepentingan dalam mengoptimalkan sumber daya restorasi secara lebih terukur.

Sebagai keterbatasan, penelitian ini belum menyertakan data validasi lapangan (*in-situ*) sehingga akurasi absolut peta sebaran status risiko *coral bleaching* tidak dapat dievaluasi secara langsung. Oleh karena itu, *output* penelitian ini berfungsi sebagai model prediktif yang memerlukan validasi lebih lanjut melalui survei lapangan. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan validasi *in-situ* untuk mengkonfirmasi hasil pemetaan, serta mengintegrasikan faktor lingkungan lokal lainnya seperti sedimentasi, arus, dan kualitas air untuk analisis yang lebih komprehensif.

5. REFERENSI

- Afifah, A. N., Abdunnur, & Efendi, M. (2025). Komparasi Kualitas Air Pada Perairan Ekosistem Terumbu Karang Di Dalam Dan Di Luar Kawasan Konservasi Kota Bontang Kalimantan Timur. *Jurnal Laot Ilmu Kelautan*, 7(1), 80–85.
- Ampou, E. ., Manessa, M. D. ., Hamzah, F., & Widagti, Nu. (2020). Study of Sea Surface Temperature (SST), Does It Affect Coral Reefs? *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 12(2), 199–213.
- BMKG. 2025. *Dampak Fenomena Iklim Global terhadap Curah Hujan dan Suhu di Indonesia pada Tahun 2025*. <https://gaw-bariri.bmkg.go.id/index.php/karya-tulis-dan-artikel/artikel/208-dampak-fenomena-iklim-global-terhadap-curah-hujan-dan-suhu-di-indonesia-pada-tahun-2025>.
- Dedi, Zamani, N. P., & Arifin, T. (2016). Hubungan Paranter Lingkungan terhadap Gangguan Kesehatan Karang di Pulau Tunda-Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 11(2), 105–118.
- Febriana, Darmawan, F., & Wibowo, S. T. (2022). Komponen pariwisata dan daya dukung kawasan di pulau liwungan. *Jurnal Kepariwisata* |, 21(1), 30–39.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoidi, L. (2014). The Effectiveness of Coral Reefs for Coastal Hazard Risk Reduction and Adaptation. *Nature Communications*, 5(3749), 1–9.
- González-Barrios, F. J., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cerventes, E., Secaira-Fajardo, F., & Álvarez-Filip,

- L. (2023). Legacy Effects of Anthropogenic Disturbances Modulate Dynamics in the World's Coral Reefs. *Global Change Biology*, 29(3285), 3285–3303.
- Goreau, T. J., & Hilbertz, W. (2005). Marine Ecosystem Restoration: Costs and Benefits for Coral Reefs. *World Resource Review*, 17(3), 375–409.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Remote Sensing of Environment Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202(2017), 18–27.
- Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., Baird, A. H., Baum, J. K., Berumen, M. L., Bridge, T. C., Claar, D. C., Eakin, C. M., Gilmour, J. P., Graham, N. A. J., Harrison, H., Hobbs, J. A., Hoey, A. S., Hoogenboom, M., Lowe, R. J., ... Schoepf, V. (2020). Spatial and Temporal Patterns of Mass Bleaching of Corals in the Anthropocene. *Science*, 359(2018), 80–83.
- Hughes, T. P., Baird, A. H., Morrison, T. H., & Torda, G. (2023). Perspective Principles for Coral Reef Restoration in the Anthropocene. *One Earth*, 6(6), 656–665.
- Kopecky, K. ., Stier, A. C., Holbrook, S. J., & Moeller, H. V. (2023). *Material Legacies can Degrade Resilience : Structure-retaining Disturbances Promote Regime Shifts on Coral Reefs*. April 2022, 1–15.
- LAZ Harfa. (n.d.). Pulihkan Ekosistem Terumbu Karang Di Kawasan Pulau Liwungan Pandeglang, PT Telkom Indonesia Gandeng LAZ Harfa Sebagai Mitra Program. <https://lazharfa.org/pulihkan-ekosistem-terumbu-karang-di-kawasan-pulau-liwungan-pandeglang-pt-telkom-indonesia-gandeng-laz-harfa-sebagai-mitra-programkom-i>.
- Mazaya, A., Yulianda, F., & Taryono. (2019). Economic Valuation of Coral Reef Ecosystem for Marine Tourism in Karimunjawa National Park. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science PAPER*, 2019(012025), 1–7.
- Mira, Saptanto, S., & Hikmah. (2017). Valuasi Nilai Ekonomi Terumbu Karang di Banda Neira. *J. Sosek KP*, 12(1), 11–20.
- NOAA. (2020). *Methodology, Product Description, and Data Availability of NOAA Coral Reef Watch's Version 3.1 Daily Global 5km Satellite Coral Bleaching Heat Stress Monitoring Products*. <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/methodology.php>.
- Obura, D. O., Aeby, G., Amornthammarong, N., Appeltans, W., Bax, N., Bishop, J., Brainard, R. E., Chan, S., Fletcher, P., Gordon, T. A. ., Gramer, L., Gudka, M., & Halas, J. (2019). Coral Reef Monitoring, Reef Assessment Technologies, and Ecosystem-Based Management. *Frontiers in Marine Science*, 6(2019), 1–21.
- Razak, T. B., Irhas, M., Nikita, L., Vida, R. T., Maserati, S., Aja, C., & Alisa, G. (2025). *Coral Bleaching and Recovery on Urban Reefs off Jakarta, Indonesia, during the 2023–2024 Thermal Stress Event*. 1–9.
- Skirving, W., Marsh, B., Cour, J. D. La, Liu, G., Harris, A., Maturi, E., Geiger, E., & Eakin, C. M. (2020). Coral Temp and the Coral Reef Watch Coral Bleaching Heat Stress Product Suite Version 3.1. *Remote Sensing*, 12(3856), 1–10.
- Smallhorn-west, P. F., Cohen, P. J., Morais, R. A., Januchowski-hartley, F. A., Malimali, S., Stone, K., Warren, R., & Cinner, J. E. (2022). Hidden Benefits and Risks of Partial Protection for Coral Reef Fisheries. *Ecology and Society*, 27(1), 1–9.
- Speiser, W. H., & Largier, J. L. (2024). High-Resolution Nearshore Sea Surface Temperature from Calibrated Landsat Brightness Data. *Remote Sensing*, 16(4477), 1–21.
- Sully, S., Burkepile, D. E., Donova, M. ., Hodgson, G., & Van Woesik, R. (2019). A Global Analysis of Coral Bleaching over the Past Two Decades. *Nature Communications*, 10(1264), 1–5.
- Tan, F., Samanta, D., Morgan, K., Martin, P., Chua, S., Aw, Z., Lai, I., Meltzner, A. J., Wang, J., & Horton, B. P. (2025). *El Niño was a Key Driver of Anomalous Ocean Warming in Southeast Asia in 2023*. 1–16.
- Vardi, T., Hoot, W. C., Levy, J., Shaver, E., Winters, R. S., Banaszak, A. T., Baums, I. B., Chamberland, V. F., Cook, N., Gulko, D., Hein, M. Y., Kaufman, L., Loewe, M., Lundgren, P., Lustic, C., Macgowan, P., Matz, M. V., Mcgonigle, M., Mcleod, I., ... Wolke, C. (2021). Six Priorities to Advance the Science and Practice of Coral Reef Restoration Worldwide. *Restoration Ecology*, 29(8), 1–7.
- Wisha, U. J., Husrin, S., & Prihantono, J. (2015). Hidrodinamika Perairan Teluk Banten Pada Musim Peralihan (Agustus – September). *Ilmu Kelautan*, 20(2), 101–112.
- Wu, K., Yang, F., & Xu, Y. (2022). Coral Reef Bleaching Monitoring based on Multitime Landsat-8

Remote sensing Image Series. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(5), 181–189.

Wulansari, W., Widada, S., Maslukah, L., Wirasatriya, A., & Surendra, O. (2025). Analysis of the November 2023 to March 2024 Marine Heatwave in the Java Sea Using Satellite and Profiling Floats Data. *Korean Journal of Remote Sensing*, 41(November 2023), 1189–1205.